

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
ESCOLA DE ENGENHARIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ESTRUTURAS

**“ESTUDO DA FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO DE VIGAS DE AÇO DE  
ALMA SENOIDAL”**

Heins Hackbarth Júnior

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de “Mestre em Engenharia de Estruturas”.

Comissão julgadora:

---

Prof. Dr. Ricardo Hallal Fakury  
DEES - UFMG (Orientador)

---

Prof. Dr. Gílson Queiroz  
DEES - UFMG

---

Prof. Dr. Julio Fruchtengarten  
EPUSP

Belo Horizonte, 10 de abril de 2006

Ao meu Pai e minha Mãe,

por me guiarem e servirem de exemplo de vida;

Ao meu Irmão,

pela amizade e apoio;

A minha Namorada,

pelo amor, carinho e compreensão;

**OFEREÇO**

Aos meus familiares e amigos que compartilham comigo esta excelente experiência, que é a vida;

**DEDICO**

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, por tudo.

Agradeço ao meu orientador Ricardo Hallal Fakury, que incentivou a participação nesta jornada de conhecimentos, compartilhando suas idéias, reflexão e seu tempo, possibilitando assim o aperfeiçoamento técnico-especializado. Agradeço também aos meus colegas, amigos, entre eles Rodrigo Vitali Lorensini, Leonardo Braga Passos, Fernanda Calenzani e professores do Departamento de Engenharia de Estrutura que contribuíram com aportes intelectuais e discussões técnicas, de grande valia para a elaboração do trabalho. Agradeço aos funcionários do DEES por sua presteza sempre que necessária.

Às instituições, tenho que agradecer, inicialmente, à USIMINAS pela bolsa de estudo, que possibilitou a dedicação integral ao trabalho. À CAPES, ao CNPq, à FAPEMIG e em especial à Codeme Engenharia S.A. que auxiliaram na elaboração deste trabalho.

## **RESUMO**

Neste trabalho é determinado numericamente, pelo método dos elementos finitos via programa ANSYS, o momento crítico elástico para o estado limite último de flambagem lateral com torção de vigas com seções I duplamente simétrica e monossimétrica de alma senoidal, submetidas a vários casos de carregamento. Os resultados são comparados com os obtidos por um procedimento simplificado, recomendado pela fabricante europeu Zeman, que considera apenas a resistência da mesa comprimida e pelo procedimento de projeto da norma americana ANSI/AISC 360-05 para vigas de alma plana, adaptado para vigas de alma senoidal. Essa comparação permite concluir que este último procedimento pode ser usado para obtenção da resistência à flambagem das vigas de alma senoidal fabricadas no Brasil com boa precisão e segurança.

**Palavras-chave:** Estruturas de aço, Flambagem lateral com torção, Vigas de alma senoidal.

## **ABSTRACT**

The problems relate to lateral-torsional buckling of doubly and singly symmetric I-shaped steel beams with sinusoidal web have been considered in this paper. ANSYS is used to obtain the critical elastic moment of beams under several types of load. The results are compared with the values of two design procedures: (1) the simplified procedure of Zeman, important European manufacturer of steel structural components with sinusoidal web, and; (2) the ANSI/AISC 360-05 procedure for I-shaped beams with flat plate web, adapted to sinusoidal web. This comparison shows that the last procedure can be used to predict the buckling capacity of the sinusoidal web beams made in Brazil with good accuracy and safety.

**Key-words:** Steel structures, Lateral-torsional buckling, Sinusoidal web beams.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	Generalidades .....	1
1.2.	Considerações Básicas Sobre a Resistência das Placas Corrugadas .....	3
1.3.	Algumas Vantagens e Desvantagens das Vigas de Alma Corrugada.....	5
1.4.	Literatura sobre flambagem lateral com torção de vigas de alma corrugada .....	6
1.5.	Dimensões e Materiais das Vigas de Alma Senoidal .....	9
1.6.	Proposta e Objetivo do Trabalho .....	10
2.	FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO.....	12
2.1.	Definição .....	12
2.2.	Fatores que Influenciam .....	12
2.3.	Distribuição das Tensões Residuais .....	16
2.4.	Métodos de Dimensionamento .....	18
2.4.1.	Procedimento do ANSI/AISC 360-05 Adaptado para Vigas de Alma Senoidal.....	18
2.4.2.	Procedimento da Zeman .....	22
3.	ANÁLISE NUMÉRICA.....	24
3.1.	Generalidades .....	24
3.2.	Uso do ANSYS para a Análise Linearizada de Flambagem .....	24
3.3.	Casos Estudados .....	26
3.4.	Vigas Estudadas.....	28
4.	RESULTADOS E AVALIAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE PROJETO.....	31
4.1.	Generalidades .....	31
4.2.	Viga de Seção Duplamente Simétrica .....	31
4.2.1.	Momentos e Cargas Transversais Aplicadas na Meia-Altura da Seção Transversal ...	32
4.2.2.	Cargas Transversais Aplicadas na Face Inferior (Estabilizantes) .....	40
4.2.3.	Cargas Transversais Aplicadas na Face Superior (Desestabilizantes) .....	50
4.3.	Viga de Seção Monossimétrica .....	58
4.3.1.	Momentos e Cargas Transversais Aplicadas na Meia-Altura da Seção Transversal ...	58
4.3.2.	Cargas Transversais Aplicadas na Face Inferior (Estabilizantes) .....	67

4.3.3. Cargas Transversais Aplicadas na Face Superior (Desestabilizantes) .....	74
4.4. Outras Seções Transversais .....	83
5. CONCLUSÕES .....	86
5.1. Considerações Gerais .....	86
5.2. Viga com Seção I Duplamente Simétrica.....	87
5.2.1. Momentos e Cargas Transversais Aplicadas na Meia-Altura da Seção Transversal ...	87
5.2.2. Cargas Transversais Aplicadas na Face Inferior (Estabilizantes) .....	88
5.2.3. Cargas Transversais Aplicadas na Face Superior (Desestabilizantes) .....	88
5.3. Viga com Seção I Monossimétrica.....	89
5.3.1. Momentos e Cargas Transversais Aplicadas na Meia-Altura da Seção Transversal ...	89
5.3.2. Cargas Transversais Aplicadas na Face Inferior (Estabilizantes) .....	89
5.3.3. Cargas Transversais Aplicadas na Face Superior (Desestabilizantes) .....	90
5.4. Análise Final e Sugestões .....	90
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	93
ANEXO DE TABELAS .....	97

## LISTA DE FIGURAS

1.1 – Peças de alma corrugada.....	1
1.2 – Galpão construído com peças de alma corrugada trapezoidal e chapas planas nas mesas – de Hoop (2003)-a.....	2
1.3 – Galpão construído com peças de alma corrugada senoidal – Codeme Engenharia S.A. ...	2
1.4 – Fabricação de peças de alma senoidal – Codeme Engenharia S.A. ....	3
1.5 – Resistência horizontal de placas corrugadas – GLP (2005).....	4
1.6 – Resistência vertical de placas corrugadas – GLP (2005) .....	4
1.7 - Resistência longitudinal de placas corrugadas – Adaptado de Hoop (2003)-a.....	5
1.8 – Vigas de alma senoidal – Codeme Engenharia S.A. ....	9
1.9 – Dimensões dos perfis e geometria das almas senoidais .....	10
2.1 – Flambagem lateral com torção .....	12
2.2 - Modos de flambagem de uma viga de seção I vistos por sobre a mesa superior.....	13
2.3 – Influência do nível de aplicação das cargas transversais.....	14
2.4 – Descontinuidade da seção transversal .....	15
2.5 – Imperfeições geométricas .....	15
2.6 – Tensões normais residuais em perfil I laminado e em chapa laminada .....	16
2.7 – Tensões normais residuais em chapa cortada a maçarico e em perfil I soldado .....	17
2.8 – Resistência nominal $M_n$ em função do índice de esbeltez $\lambda$ e de $C_b$ .....	21
2.9 – Coeficiente de instabilidade por força axial de compressão.....	22
3.1 – Malha típica de elementos finitos.....	24
3.2 – Casos de vigas considerados .....	26
3.3 – Níveis de aplicação das cargas transversais na seção transversal das vigas estudadas ...	27
3.4 – Condições de contorno .....	28
3.5 – Dimensões das vigas estudadas .....	29
3.6 – Posições como a seção transversal da viga monossimétrica foi disposta.....	29
4.1 – Valores de $M_R$ para o caso 1 na seção I duplamente simétrica.....	32
4.2 – Valores de $M_R$ para o caso 2 na seção I duplamente simétrica.....	33
4.3 – Valores de $M_R$ para o caso 3 na seção I duplamente simétrica.....	33
4.4 – Valores de $M_R$ para o caso 4 e seção I duplamente simétrica com cargas na meia-altura da seção transversal .....	34



4.5 – Valores de $M_R$ para o caso 5 e seção I duplamente simétrica com cargas na meia-altura da seção transversal .....	34
4.6 – Valores de $M_R$ para o caso 6 e seção I duplamente simétrica com cargas na meia-altura da seção transversal .....	35
4.7 – Valores de $M_R$ para o caso 7 e seção I duplamente simétrica com cargas na meia-altura da seção transversal .....	35
4.8 – Valores de $M_R$ para o caso 8 e seção I duplamente simétrica com cargas na meia-altura da seção transversal .....	36
4.9 – Valores de $M_R$ para o caso 9 e seção I duplamente simétrica com cargas na meia-altura da seção transversal .....	36
4.10 – Comparação do caso 2 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado por Reis (1996) com ANSYS 9.0 (2004).....	38
4.11 – Comparação do caso 3 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado por Reis (1996) com ANSYS 9.0 (2004).....	38
4.12 – Comparação do caso 9 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado por Reis (1996) com ANSYS 9.0 (2004) com cargas na meia-altura da seção transversal.....	39
4.13 – Distorção da alma na flambagem .....	40
4.14 – Valores de $M_R$ para o caso 4 e seção I duplamente simétrica com cargas estabilizantes .....	41
4.15 – Valores de $M_R$ para o caso 5 e seção I duplamente simétrica com cargas estabilizantes .....	41
4.16 – Valores de $M_R$ para o caso 6 e seção I duplamente simétrica com cargas estabilizantes .....	42
4.17 – Valores de $M_R$ para o caso 7 e seção I duplamente simétrica com cargas estabilizantes .....	42
4.18 – Valores de $M_R$ para o caso 8 e seção I duplamente simétrica com cargas estabilizantes .....	43
4.19 – Valores de $M_R$ para o caso 9 e seção I duplamente simétrica com cargas estabilizantes .....	43
4.20 – Comparação do caso 4 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes.....	46
4.21 – Comparação do caso 5 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes.....	46

4.22 – Comparação do caso 6 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes.....	47
4.23 – Comparação do caso 7 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes.....	47
4.24 – Comparação do caso 8 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes.....	48
4.25 – Comparação do caso 9 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes.....	48
4.26 – Idéia qualitativa da distorção da alma na flambagem.....	49
4.27 – Valores de $M_R$ para o caso 4 e seção I duplamente simétrica com cargas desestabilizantes .....	50
4.28 – Valores de $M_R$ para o caso 5 e seção I duplamente simétrica com cargas desestabilizantes .....	51
4.29 – Valores de $M_R$ para o caso 6 e seção I duplamente simétrica com cargas desestabilizantes .....	51
4.30 – Valores de $M_R$ para o caso 7 e seção I duplamente simétrica com cargas desestabilizantes .....	52
4.31 – Valores de $M_R$ para o caso 8 e seção I duplamente simétrica com cargas desestabilizantes .....	52
4.32 – Valores de $M_R$ para o caso 9 e seção I duplamente simétrica com cargas desestabilizantes .....	53
4.33 – Comparação do caso 4 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes.....	55
4.34 – Comparação do caso 5 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes.....	55
4.35 – Comparação do caso 6 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes.....	56
4.36 – Comparação do caso 7 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes.....	56
4.37 – Comparação do caso 8 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes.....	57
4.38 – Comparação do caso 9 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes.....	57
4.39 – Valores de $M_R$ para o caso 1 na seção I monossimétrica.....	59

4.40 – Valores de $M_R$ para o caso 2 na seção I monossimétrica.....	59
4.41 – Valores de $M_R$ para o caso 3 na seção I monossimétrica.....	60
4.42 – Valores de $M_R$ para o caso 4 na seção I monossimétrica com cargas na meia-altura da seção transversal.....	60
4.43 – Valores de $M_R$ para o caso 5 na seção I monossimétrica com cargas na meia-altura da seção transversal.....	61
4.44 – Valores de $M_R$ para o caso 6 na seção I monossimétrica com cargas na meia-altura da seção transversal.....	61
4.45 – Valores de $M_R$ para o caso 7 na seção I monossimétrica com cargas na meia-altura da seção transversal.....	62
4.46 – Valores de $M_R$ para o caso 8 na seção I monossimétrica com cargas na meia-altura da seção transversal.....	62
4.47 - Valores de $M_R$ para o caso 9 na seção I monossimétrica com cargas na meia-altura da seção transversal.....	63
4.48 – Comparação do caso 2 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) .....	64
4.49 – Comparação do caso 3 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) .....	65
4.50 – Comparação do caso 6 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas na meia-altura da seção transversal .....	65
4.51 – Comparação do caso 7 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas na meia-altura da seção transversal .....	66
4.52 – Comparação do caso 8 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas na meia-altura da seção transversal .....	66
4.53 – Valores de $M_R$ para o caso 4 e seção I monossimétrica com cargas estabilizantes.....	67
4.54 – Valores de $M_R$ para o caso 5 e seção I monossimétrica com cargas estabilizantes.....	68
4.55 – Valores de $M_R$ para o caso 6 e seção I monossimétrica com cargas estabilizantes.....	68
4.56 – Valores de $M_R$ para o caso 7 e seção I monossimétrica com cargas estabilizantes.....	69
4.57 – Valores de $M_R$ para o caso 8 e seção I monossimétrica com cargas estabilizantes.....	69
4.58 – Valores de $M_R$ para o caso 9 e seção I monossimétrica com cargas estabilizantes.....	70
4.59 – Comparação do caso 5 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes.....	71
4.60 – Comparação do caso 6 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes.....	72

4.61 – Comparação do caso 7 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes.....	72
4.62 Comparação do caso 8 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes .....	73
4.63 – Comparação do caso 9 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes.....	73
4.64 – Valores de $M_R$ para o caso 4 e seção I monossimétrica com cargas desestabilizantes..	75
4.65 – Valores de $M_R$ para o caso 5 e seção I monossimétrica com cargas desestabilizantes..	75
4.66 – Valores de $M_R$ para o caso 6 e seção I monossimétrica com cargas desestabilizantes..	76
4.67 – Valores de $M_R$ para o caso 7 e seção I monossimétrica com cargas desestabilizantes..	76
4.68 – Valores de $M_R$ para o caso 8 e seção I monossimétrica com cargas desestabilizantes..	77
4.69 – Valores de $M_R$ para o caso 9 e seção I monossimétrica com cargas desestabilizantes..	77
4.70 – Comparação do caso 4 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes.....	80
4.71 – Comparação do caso 5 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes.....	80
4.72 – Comparação do caso 6 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes.....	81
4.73 – Comparação do caso 7 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes.....	81
4.74 – Comparação do caso 8 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes.....	82
4.75 – Comparação do caso 9 entre o procedimento AISC-SEN usando $C_b$ dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes.....	82
4.76 – Dimensões das vigas com altura de alma de 400 mm .....	83
4.77 – Dimensões das vigas com altura de alma de 1200 mm .....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 – Valores de $C_b$ para viga duplamente simétrica com cargas estabilizantes .....	45
Tabela 4.2 – Valores de $C_b$ para viga duplamente simétrica com cargas desestabilizantes .....	54
Tabela 4.3 – Valores de $C_b$ para viga monossimétrica .....	64
Tabela 4.4 – Valores de $C_b$ para viga monossimétrica, cargas estabilizantes .....	71
Tabela 4.5 – Valores de $C_b$ para viga monossimétrica, cargas desestabilizantes .....	79
Tabela 4.6 – Valores de $M_R$ para as vigas com altura de alma de 400 mm .....	85
Tabela 4.7 – Valores de $M_R$ para as vigas com altura de alma de 1200 mm .....	85

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A_{fc}$	área da mesa comprimida
$A_{ft}$	área da mesa tracionada
$b_f$	largura da mesa da seção transversal
$b_w$	largura da curva senoidal da seção transversal
$C_b$	fator de momento equivalente que relaciona $M_{cr}$ e $M_{0cr}$ , nos casos de diagrama de momento não uniforme
$C_w$	momento de inércia setorial ou constante de empenamento
$d$	altura da seção transversal
$D$	centro de torção
$e$	excentricidade
$e_v$	excentricidade inicial
$E$	módulo de elasticidade longitudinal, para o aço $E = 205000$ MPa
$F_L$	tensão na qual se inicia o escoamento da mesa comprimida
$f_{yf}$	resistência ao escoamento do aço das mesas
$G$	módulo de elasticidade transversal
$h$	altura da alma
$h_0$	distância entre os centros geométrico das mesas
$I_t$	momento de inércia à torção
$I_y$	momento de inércia em relação ao eixo $y$
$I_{yfc}$	momento de inércia em relação ao eixo $y$ da mesa comprimida
$I_{yft}$	momento de inércia em relação ao eixo $y$ da mesa tracionada
$k_c$	coeficiente ligado à instabilidade
$L$	vão da viga
$L_b$	comprimento do trecho sem contenção lateral à flambagem lateral com torção (comprimento destravado)
$M_A$	momento fletor, em valor absoluto, a 1/4 do comprimento destravado
$M_B$	momento fletor, em valor absoluto, no ponto médio do comprimento destravado
$M_C$	momento fletor, em valor absoluto, a 3/4 do comprimento destravado
$M_{max}$	momento fletor máximo, em valor absoluto, no comprimento destravado
$M_n$	resistência nominal ao momento fletor
$M_R$	momento fletor resistente à flambagem lateral com torção em regime elástico

$M_{rf}$	momento fletor correspondente ao início do escoamento das mesas
$M_{pff}$	momento de plastificação da seção transversal
$N_{Rk,fc}$	força axial resistente da mesa comprimida
$r_{yfc}$	raio de giração da mesa comprimida em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma
$R_a$	coeficiente para levar em conta a atuação de cargas transversais em nível distinto da semi-altura da seção transversal
$R_m$	parâmetro de monossimetria
$t_{fi}$	espessura da mesa inferior da seção transversal
$t_{fs}$	espessura da mesa superior da seção transversal
$t_w$	espessura da alma da seção transversal
$W_{xc}$	módulo de resistência elástico relacionado à face comprimida
$W_{xt}$	módulo de resistência elástico relacionado à face tracionada
$y$	distância da semi-altura da seção transversal ao ponto de aplicação da carga (negativo para carga gravitacional acima da semi-altura e positivo para carga gravitacional abaixo da semi-altura)
$\alpha_{yf}$	parâmetro igual a $\frac{I_{yfc}}{I_{yft}}$
$\beta_x$	parâmetro igual a $0,90 h_o \left( \frac{\alpha_{yf} - 1}{\alpha_{yf} + 1} \right)$
$\phi$	rotação em torno do eixo que passa pelo centro de torção, paralelo ao eixo z
$\phi_B$	rotação da mesa inferior
$\phi_T$	rotação da mesa superior
$\phi_v$	rotação inicial
$\lambda$	parâmetro ou índice de esbeltez
$\lambda_0$	parâmetro ou índice de esbeltez reduzido
$\lambda_i$	enésimo autovalor
$\lambda_p$	parâmetro ou índice de esbeltez correspondente à plastificação
$\lambda_r$	parâmetro ou índice de esbeltez correspondente ao início do escoamento, com ou sem tensão residual
$\eta$	parâmetro igual a 1,76 para as seções duplamente simétricas e 1,10 para as monossimétricas

$\mu$	deslocamento na direção do eixo $x$
$\mu_B$	curvatura da mesa inferior
$\mu_T$	curvatura da mesa superior
$\mu_v$	curvatura inicial
$\sigma_{cr}$	máxima tensão residual de compressão na mesa comprimida
$\nu$	coeficiente de Poisson
$\omega$	empenamento
$[f]$	vetor análogo ao vetor de forças nodais
$[F]$	vetor análogo ao vetor de forças do sistema
$[K]$	matriz de rigidez do sistema
$[K_G]$	matriz de rigidez geométrica
$[S]$	matriz que simula a tendência da distribuição de tensões iniciar a flambagem considerando as deformações de segunda ordem
$[u]$	vetor dos deslocamentos nodais
$[z_i]$	matriz do enésimo autovetor



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. Generalidades

Nos últimos anos, os avanços do estudo do comportamento estrutural e da tecnologia de fabricação permitiram o desenvolvimento e o uso de peças com seção I, nas quais as mesas normalmente são constituídas por chapas planas e a alma por uma chapa fina corrugada, conforme Wang (2003). A corrugação da chapa da alma pode apresentar forma trapezoidal ou senoidal (Figura 1.1), dentre outras.

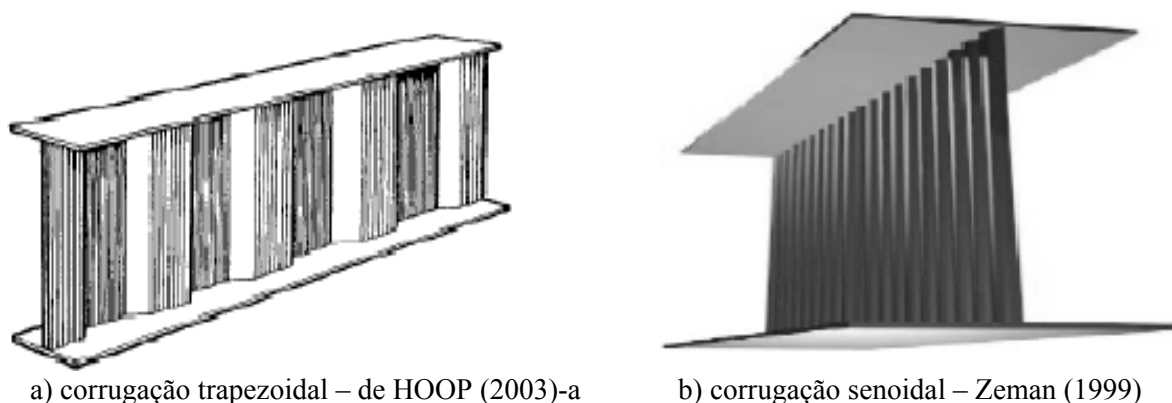


Figura 1.1 – Peças de alma corrugada

Objetivando a redução do peso estrutural e do custo de fabricação, os perfis de alma corrugada começaram a ser fabricados em 1966, na Suécia para serem usados em pontes. Desde então, empresas como a “GLP Corrugated Plate Industry” nos Países Baixos, a “Ranabalken” na Suécia e a “Zeman & Co” na Áustria têm construído, produzido e distribuído estes perfis no mercado internacional, segundo Codeme Engenharia (2005). Atualmente, as peças de alma corrugada têm sido usadas nas mais diversas aplicações estruturais, principalmente quando a solicitação ao momento fletor é predominante em relação à solicitação à força axial, em construções como pontes, galpões comerciais, edifícios industriais, passarelas de pedestres, estruturas de correias transportadoras e silos. Como ilustração, a Figura 1.2 mostra um galpão com pilares, tesouras e vigas de rolamento construído com peças de alma corrugada trapezoidal na Europa e a Figura 1.3, um galpão no Brasil com pilares e tesouras com peças de alma corrugada senoidal.



Figura 1.2 – Galpão construído com peças de alma corrugada trapezoidal e chapas planas nas mesas  
– de Hoop (2003)-a



Figura 1.3 – Galpão construído com peças de alma corrugada senoidal – Codeme Engenharia S.A.

No caso específico das peças de alma corrugada senoidal, que serão objeto deste trabalho, essas têm sido usadas em países como Áustria, Alemanha, Holanda, Suécia, França, Estados Unidos e Japão, nas diversas aplicações estruturais relatadas anteriormente. Sua fabricação é feita por modernos equipamentos automáticos que desbobinam, aplanam, cortam e corrugam a chapa da alma e efetuam sua soldagem às duas chapas planas das mesas (Figura 1.4).



Figura 1.4 – Fabricação de peças de alma senoidal – Codeme Engenharia S.A.

## 1.2. Considerações Básicas Sobre a Resistência das Placas Corrugadas

A placa corrugada possui maior resistência a forças que atuam perpendicularmente a seu plano médio (resistência horizontal – Figura 1.5) e no seu próprio plano médio (resistência vertical – Figura 1.6), em relação à placa plana.


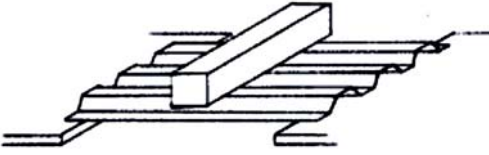
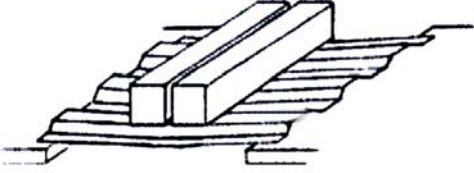
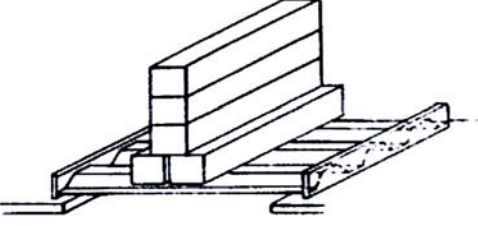
	<p>Uma placa plana fina de aço, apoiada em duas bordas, apresentará grandes deslocamentos verticais, podendo entrar em colapso sob ação apenas do seu peso próprio.</p>
	<p>Se a mesma placa de aço for corrugada na direção perpendicular aos apoios, poderá ser capaz de suportar várias vezes seu peso próprio.</p>
	<p>Se a carga ultrapassar o limite de resistência da placa ocorrerá o colapso, com o aplanamento das corrugações.</p>
	<p>Se forem usados enrijecedores transversais nas extremidades apoiadas, aumentará sensivelmente a capacidade da placa corrugada de suportar cargas.</p>

Figura 1.5 – Resistência horizontal de placas corrugadas – GLP (2005)

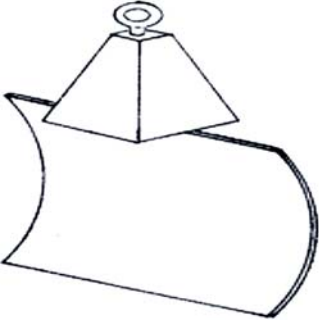
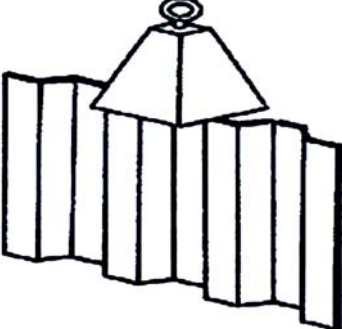
	<p>Uma pequena força de compressão em uma placa fina de aço poderá provocar sua flambagem, tendo em vista a reduzida rigidez à flexão na direção perpendicular ao plano da placa.</p>
	<p>Se a mesma placa for corrugada, haverá um significativo aumento de rigidez à flexão na direção perpendicular ao seu plano médio e, conseqüentemente, a capacidade de resistir à força de compressão se elevará consideravelmente.</p>

Figura 1.6 – Resistência vertical de placas corrugadas – GLP (2005)

Por outro lado, em decorrência da corrugação, a placa passa a ter pouca resistência quando submetida a forças na direção perpendicular às nervuras (Figura 1.7). Nos projetos estruturais, tal fato é levado em conta desprezando a participação da alma na resistência às tensões normais. Isto significa, em termos estáticos, nas peças submetidas à flexão, que o comportamento de peças de alma corrugada corresponde ao de treliças, em que o momento fletor e a força axial são resistidos somente pelas mesas e a força cortante pela alma. Nas peças submetidas somente à força axial, esta é resistida apenas pelas mesas.

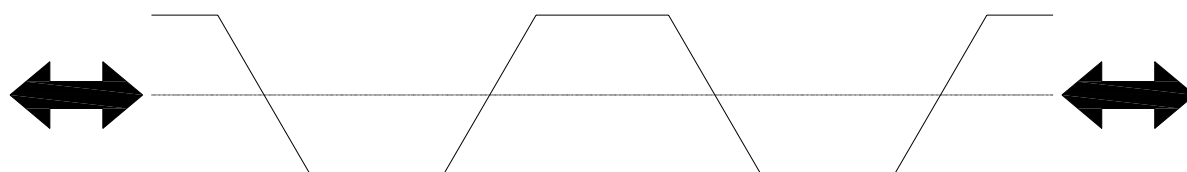


Figura 1.7 - Resistência longitudinal de placas corrugadas – Adaptado de Hoop (2003)-a

### 1.3. Algumas Vantagens e Desvantagens das Vigas de Alma Corrugada

As vigas constituídas por perfis laminados, em grandes vãos, podem onerar a obra, pois a medida que se aumenta a altura da seção transversal, ocorre um acréscimo de peso em proporção maior. Perfis soldados de alma plana com seções mais altas e com dimensões quaisquer podem ser fabricados visando redução de peso mas, à medida que se aumenta a altura e a relação entre a altura e a espessura da alma, a instabilidade desse elemento por força cortante torna necessária a colocação de enrijecedores transversais. As vigas de alma senoidal permitem considerável redução de peso, uma vez que a alma, mesmo de espessura muito pequena, apresenta grande resistência à flambagem local por cisalhamento, atingindo em grande parte das vezes a força cortante resistente plástica. Em comparação com as treliças, apresentam peso equivalente e menores custos de produção e de manutenção futura.

Hamada *et al.* (1984), citados em Wang (2003), apresentaram um estudo mostrando que as vigas de alma corrugada pesam entre 9% e 13% menos que as vigas de alma plana. Por causa da alta relação entre resistência e peso próprio, as vigas de alma corrugada permitem que maiores vãos sejam vencidos, diminuindo o número de pilares da obra e, conseqüentemente, de elementos de fundação, proporcionando maior velocidade e menor custo de montagem.

Em comparação com as peças de alma corrugada trapezoidal, as peças de alma senoidal possuem alguns aspectos favoráveis, como uma fabricação mais otimizada, menor susceptibilidade à flambagem local da alma, por não haver partes planas, e uma melhor aplicabilidade em estruturas sujeitas à fadiga.

Apesar das vantagens, em termos mundiais, as peças de alma corrugada ainda apresentam uso reduzido, principalmente por não constarem de normas de projeto de estruturas de aço de abrangência internacional como o ANSI/AISC 360-05 (2005), da falta de programas para o dimensionamento e de serem desconhecidas da maioria dos projetistas. No Brasil, somente no ano de 2005 essas peças com fabricação automatizada começaram a ser utilizadas, mas apenas com alma senoidal.

Entre as desvantagens, talvez a principal encontra-se relacionada ao projeto e à execução de ligações. Por exemplo, é necessário substituir, nas ligações onde a alma tenha a função de transmitir tensões normais, a alma corrugada por uma alma plana nas extremidades da peça. Uma opção seria efetuar ligações sem a participação da alma, mas isto muitas vezes leva a soluções pouco convencionais. Outra desvantagem refere-se ao comportamento em situações de incêndio, onde a baixa espessura da alma pode causar aquecimento mais rápido da peça. Cita-se ainda o aspecto estético, que pode desagradar a alguns observadores.

#### **1.4. Literatura sobre flambagem lateral com torção de vigas de alma corrugada**

A flambagem lateral com torção, o estado limite último objetivado neste trabalho, é sempre considerado no dimensionamento de vigas de aço. Se as vigas possuem seção I de alma plana, como é usual, os procedimentos já estão consolidados e previstos pelas mais conceituadas normas e especificações de projeto estrutural. Esses procedimentos têm como ponto de partida a determinação do momento crítico elástico, para os mais diversos tipos de carregamento, a partir do qual, com algumas aproximações, obtém-se o momento fletor resistente para a instabilidade da viga no próprio regime elástico e no regime não elástico. No entanto, de acordo com Trahair (1993), os procedimentos baseiam-se em duas filosofias distintas. De um lado, os regulamentos de países americanos, como os Estados Unidos e o Canadá, incluindo o Brasil, assumem que a flambagem em regime elástico ocorre quando é alcançado o momento

crítico clássico para barras perfeitamente retas. Em regime elastoplástico, usa-se uma equação de transição empírica até a região em que ocorre a plastificação total da seção transversal. De outro lado, os regulamentos dos países europeus, que assumem, para as vigas, curvas de instabilidade de barras axialmente comprimidas, incorporando as imperfeições geométricas e de material dessas últimas.

Os regulamentos dos países americanos conduzem a momentos resistentes superiores aos dos países europeus, especialmente para a instabilidade em regime elastoplástico, mas conforme Trahair (1993), próximos da média de resultados de ensaios. Adicionalmente, Castro e Silva et al. (2000) e Fakury et al. (2003) realizaram ensaios de flambagem lateral com torção no Brasil e mostraram a existência de boa concordância entre os resultados destes e os obtidos pelos regulamentos dos países americanos.

No que se refere às vigas de alma corrugada, os principais regulamentos de abrangência internacional não prevêm procedimentos para determinação do momento resistente de flambagem lateral com torção, possivelmente pelo fato de essas vigas terem sido introduzidas há poucos anos na construção metálica e por falta de pesquisas consistentes sobre o assunto. Para tentar suprir esse vácuo, fabricantes têm proposto o uso de procedimentos simplificados, como a Zeman (1999), importante fornecedora europeia de peças de alma senoidal, que recomenda usar o método do DAST – Richtlinie 015 (1990). Por esse método, despreza-se na viga a alma e obtém-se o momento resistente a partir da força axial resistente da mesa comprimida, considerando-a como uma barra isolada de seção retangular sujeita à instabilidade por flexão em relação a seu eixo de maior momento de inércia.

Entre as pesquisas desenvolvidas, merece citações Lindner (1990), que apresenta um procedimento, com base em análise numérica pelo Método dos Elementos Finitos e em ensaios, para a determinação da resistência ao empenamento das vigas de alma corrugada trapezoidal. Com essa resistência, recomendou usar o procedimento da norma alemã DIN 18800 (1988) relacionado a vigas de alma plana.

Wang (2003) fez um estudo completo do comportamento de vigas de alma corrugada trapezoidal e mesas tubulares, incluindo assim a flambagem lateral com torção. Ensaiou três vigas diferentes em escala real e ainda efetuou a análise numérica dessas vigas com base no Método dos Elementos Finitos, utilizando o programa ABAQUS (1992). Os resultados dos

ensaios e das modelagens mostraram que em nenhuma das vigas ocorreu flambagem lateral de torção, não obtendo, portanto, conclusões expressivas relacionadas à questão.

O pesquisador de Hoop (2003)-b afirma que não é fácil determinar a resistência à flambagem lateral com torção de vigas de alma corrugada. Por esta razão, somente poucos estudiosos têm tratado do assunto e nenhuma solução satisfatória foi ainda encontrada. Deste modo, a maioria dos projetistas, por simplicidade e segurança, verifica apenas a flambagem da mesa comprimida em relação a seu eixo de maior inércia, obedecendo ao já citado procedimento proposto pela Zeman (1999).

Sayed-Ahmed (2005) estudou a flambagem lateral com torção em vigas de alma corrugada trapezoidal com seção duplamente simétrica, por meio de análise numérica com base no Método de Elementos Finitos usando o programa ANSYS 5.4, para determinar momento resistente elástico. Os resultados obtidos foram comparados com os momentos resistentes de vigas de alma plana de mesma espessura. As vigas, com seção transversal duplamente simétrica em forma de I, foram submetidas a momentos nas extremidades e cargas concentradas aplicadas no meio do vão, em três situações diferentes, na face superior (carga desestabilizante), na face inferior (carga estabilizante) e na meia-altura da seção transversal (nível do centro de torção). Foi verificado que o procedimento proposto pela AISC/LRFD (1999), para vigas de alma plana, pode ser utilizado com segurança nas vigas de alma trapezoidal, uma vez que os resultados obtidos indicaram que o momento resistente nas vigas de alma corrugada é maior que nas vigas de alma plana. Nos casos estudados, a variação situou-se entre 15% e 37% para momentos aplicados nas extremidades, e entre 12% e 20% para vigas sujeitas a cargas concentradas centrais.

No que se refere especialmente à flambagem lateral com torção das vigas de alma corrugada senoidal, nenhum trabalho mais elaborado foi ainda produzido, exceto aqueles executados durante a pesquisa que deu origem ao presente projeto de pesquisa, Fakury *et al.* (2005, 2006-a e 2006-b).



### 1.5. Dimensões e Materiais das Vigas de Alma Senoidal

Neste trabalho são tratadas as vigas de alma senoidal fabricadas no Brasil, que têm seção transversal duplamente simétrica ou monossimétrica em forma de I e são constituídas por mesas de chapas planas cortadas a maçarico e alma de chapa fina com corrugação senoidal (Figura 1.8).



Figura 1.8 – Vigas de alma senoidal – Codeme Engenharia S.A.

As dimensões dos perfis e a geometria das almas senoidais são mostradas respectivamente na Figura 1.9, conforme a empresa Codeme Engenharia (2005), o fabricante brasileiro das peças de alma senoidal que, em decorrência das disponibilidades de produtos no mercado nacional, utiliza nas mesas aço estrutural USI CIVIL 350, da Usiminas, com resistência ao escoamento de 350 MPa e à ruptura de 500 MPa, e na alma aço USI CIVIL 300, respectivamente com resistências de 300 MPa e 410 MPa.

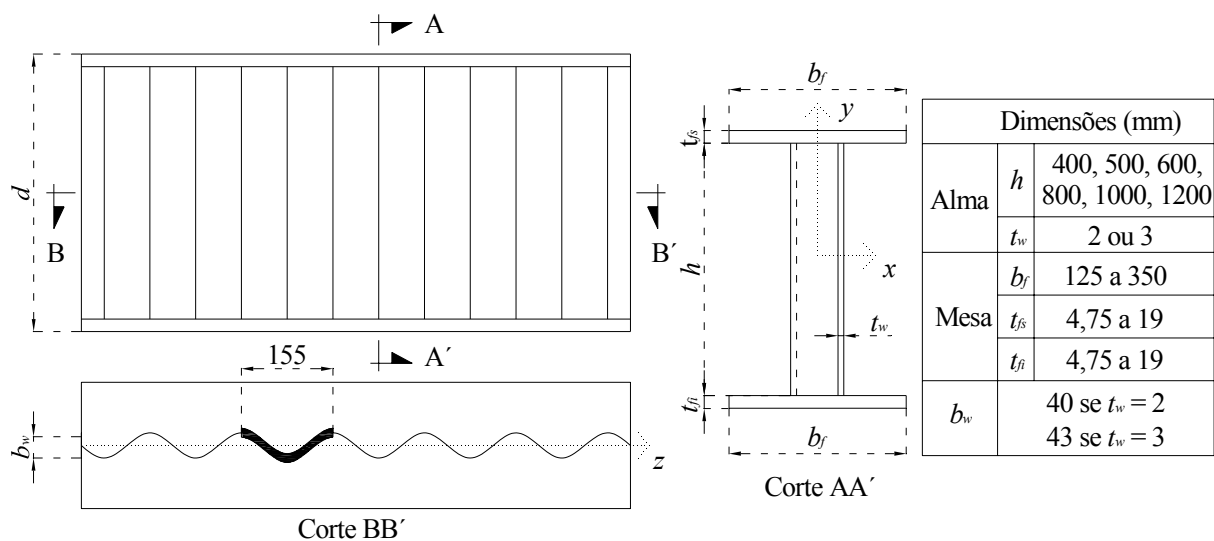


Figura 1.9 – Dimensões dos perfis e geometria das almas senoidais

Destaca-se que a empresa europeia Zeman, fabrica perfis de mesmas dimensões e geometria das almas senoidais, mas com altura da alma ( $h$ ) variando de 500 mm a 1500 mm. Atualmente essa empresa também produz barras com altura da alma variável ao longo do comprimento.

## 1.6. Proposta e Objetivo do Trabalho

Este trabalho tem como finalidade propor um procedimento para determinação do momento fletor resistente das vigas de aço de alma senoidal, de seções I duplamente simétrica e monossimétrica, fabricadas no Brasil, com as chapas planas das mesas cortadas a maçarico, para o estado limite último de flambagem lateral com torção. Para isso:

- será desenvolvido um procedimento fundamentado no do ANSI/AISC 360-05 (2005), para vigas de alma plana com seção I, com complementação para considerações das cargas aplicadas em qualquer altura da seção transversal e adaptações para utilização nas vigas de alma senoidal;
- será descrito, para efeito de análise e comparação, o procedimento de projeto simplificado recomendado pela Zeman (1999) para vigas de alma senoidal;

- c) serão processadas numericamente, usando o método dos elementos finitos via programa ANSYS 9.0 (2004), para obtenção do momento fletor resistente elástico, duas vigas de alma senoidal, uma com seção duplamente simétrica e outra com seção monossimétrica, submetidas a alguns casos representativos de carregamento, variando-se o comprimento destravado;
- d) outras vigas com seções distintas serão também processadas, usando o programa ANSYS 9.0 (2004), para validação dos resultados obtidos a qualquer seção transversal;
- e) os valores do momento fletor resistente elástico obtidos da análise numérica serão discutidos e avaliados criticamente em conjunto com os resultados dos procedimentos citados nas alíneas a e b.

As vigas analisadas terão extremidades com empenamento livre e torção impedida (“vínculo de garfo”) e cargas transversais, quando existirem, aplicadas em três níveis distintos, na semi-distância entre os centros geométricos das mesas superior e inferior, na face inferior e na face superior da seção transversal. Os dois últimos níveis permitem considerar a influência da altura de aplicação das cargas nos valores do momento resistente.

## 2. FLAMBAGEM LATERAL COM TORÇÃO

### 2.1. Definição

A flambagem lateral com torção de vigas é uma instabilidade causada pelo momento fletor que envolve flexão lateral, caracterizado pelo deslocamento  $\mu(z)$  do centro de torção, e torção, caracterizada pela rotação  $\phi(z)$ , conforme mostrado na Figura 2.1.

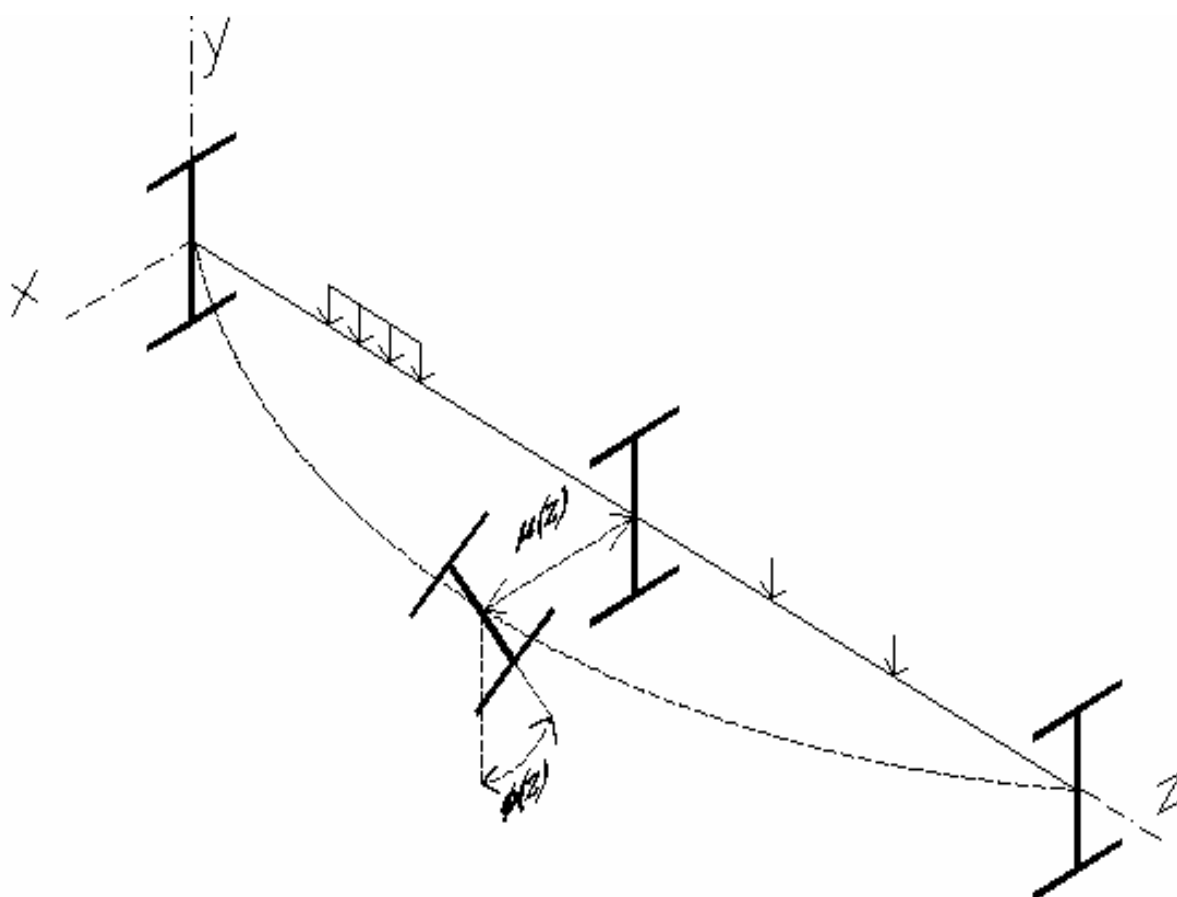


Figura 2.1 – Flambagem lateral com torção

### 2.2. Fatores que Influenciam

De acordo com Reis (1996), a resistência das vigas à flambagem lateral com torção depende de diversos fatores. Para as seções I fletidas em torno do eixo perpendicular à alma, destacam-se:

a) o comprimento do trecho sem contenção à flambagem lateral com torção

O momento fletor resistente é tanto menor quando maior for o comprimento destravado, como é denominado o comprimento do trecho sem contenção à flambagem lateral com torção. Este comprimento é uma das grandezas que definem se o fenômeno se dará em regime elástico ou inelástico, ou ainda sua impossibilidade de ocorrência, em consequência de formação anterior de uma ou mais rótulas plásticas.

b) as condições de contorno de seções com restrição à flambagem lateral com torção

Os quatro deslocamentos importantes, que podem ser impedidos em uma seção transversal, restringindo a possibilidade de ocorrência da flambagem lateral com torção são a rotação  $\phi$  e o empenamento  $\omega$ , que é uma função de  $\phi'$ , decorrentes da torção, o deslocamento do centro de torção no plano perpendicular ao de flexão,  $\mu$ , e a curvatura correspondente,  $\mu'$ . Quanto mais deslocamentos forem impedidos, maior será a resistência da viga. Em grande parte das vezes, na prática, as condições de contorno costumam apresentar as seguintes características:

- todos os deslocamentos ( $\phi$ ,  $\omega$ ,  $\mu$  e  $\mu'$ ) impedidos, em um tipo de restrição à flambagem lateral com torção denominado “vínculo rígido”;
- os deslocamentos  $\phi$  e  $\mu$  impedidos e  $\omega$  e  $\mu'$  liberados, em um tipo de restrição à flambagem lateral com torção denominado “vínculo de garfo”.

A Figura 2.2 mostra os modos de flambagem de uma viga de seção I com estes dois tipos de condições de contorno nas extremidades do comprimento destravado. A viga com vínculos rígidos, obviamente, apresenta maior resistência à flambagem lateral com torção.

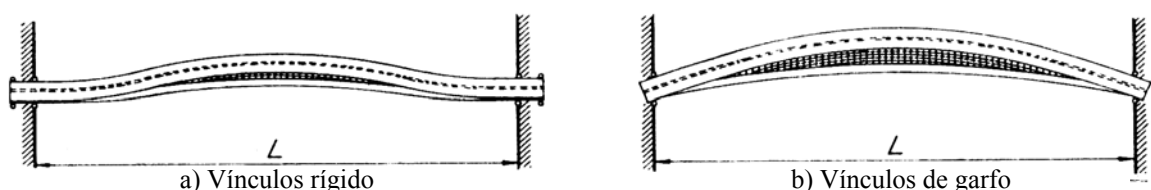


Figura 2.2 - Modos de flambagem de uma viga de seção I vistos por sobre a mesa superior

c) a variação do momento fletor

A pior é aquela em que o momento fletor é constante ao longo do comprimento destravado da viga, já que ocorre compressão de mesma intensidade em uma parte da seção transversal ao longo de todo esse comprimento. Todas as outras situações em que o momento fletor é variável são mais favoráveis, em maior ou menor grau.

d) nível de aplicação das cargas em relação ao centro de torção

Quando as cargas transversais situam-se em nível diferente do centro de torção da seção transversal ( $D$ ) e tendem a reduzir a torção após a ocorrência da flambagem, aumentam a resistência da viga à instabilidade (Figura 2.3.a), sendo portanto chamadas de estabilizantes. Ao contrário, quando a linha de ação das cargas se afasta do centro de torção durante a flambagem, reduzem a resistência da viga (Figura 2.3.b), sendo denominadas desestabilizantes. Se as cargas situam-se no nível do centro de torção, não são nem estabilizantes nem desestabilizantes (Figura 2.3.c). Na prática, uma situação usual de cargas estabilizantes ocorre quando estas são aplicadas na face inferior da seção transversal da viga e de cargas desestabilizantes, quando estas são aplicadas na face superior.

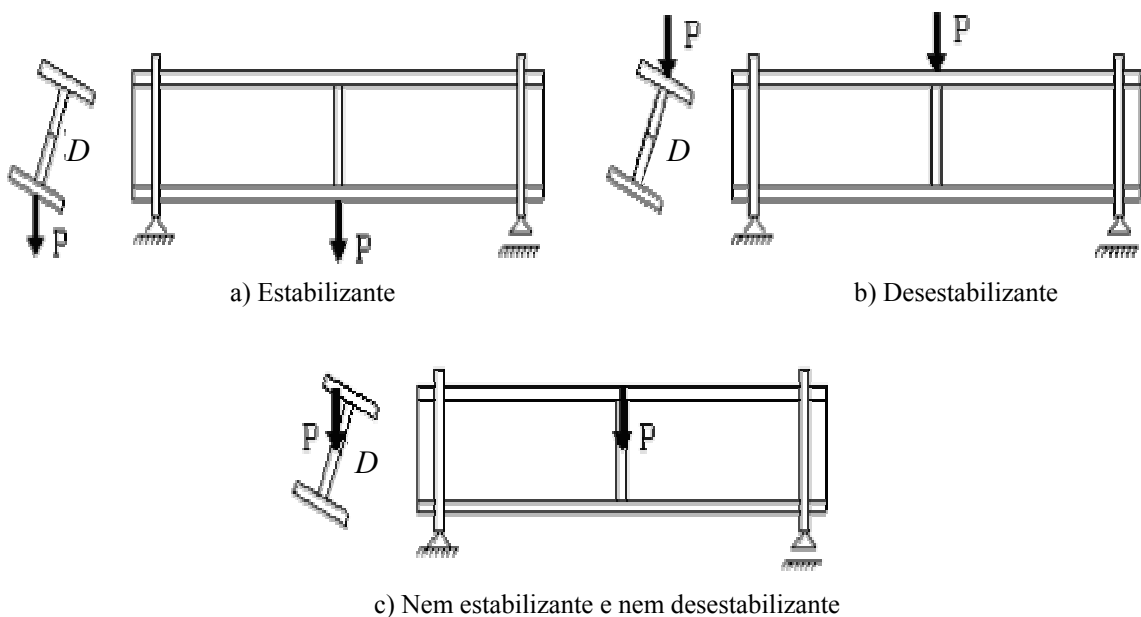


Figura 2.3 – Influência do nível de aplicação das cargas transversais

e) tensões residuais

A magnitude e a distribuição das tensões residuais implicam na antecipação ou retardamento da passagem da flambagem lateral com torção do regime elástico para o inelástico (ver sub-item 2.3).

f) Descontinuidades da seção transversal de viga

Muitas vezes, as seções transversais das vigas possuem descontinuidades causadas, por exemplo, por recortes nas mesas nas extremidades (Figura 2.4.a), para facilitar as ligações a outros componentes da estrutura e por aberturas na alma (Figura 2.4.b), para passagem de dutos de serviços, que podem reduzir a resistência à flambagem lateral com torção.

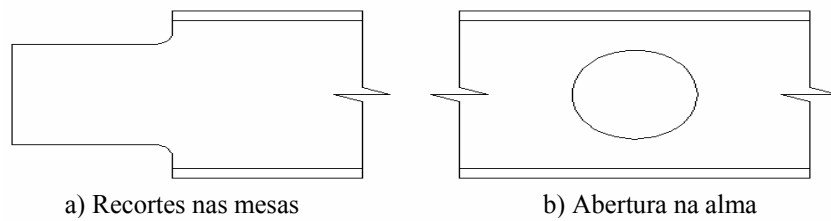


Figura 2.4 – Descontinuidade da seção transversal

g) imperfeições geométricas iniciais

São imperfeições geométricas iniciais a excentricidade da linha de ação das cargas em relação ao centro de torção (Figura 2.5.a), uma rotação inicial (Figura 2.5.b) ou uma curvatura inicial perpendicular ao carregamento (Figura 2.5.c) da barra.

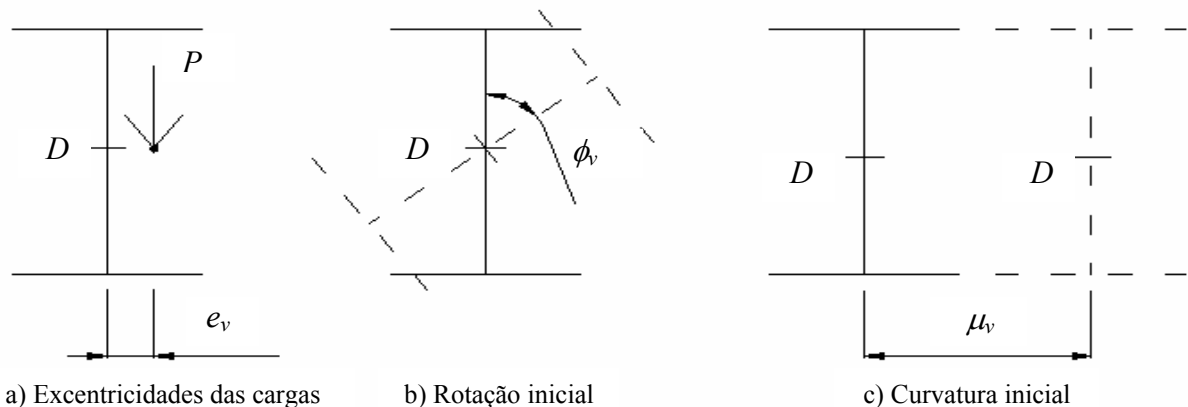


Figura 2.5 – Imperfeições geométricas

### 2.3. Distribuição das Tensões Residuais

Denominam-se tensões residuais às tensões normais ou de cisalhamento que aparecem durante o resfriamento não-uniforme de um perfil, decorrentes do processo de fabricação. Como as tensões residuais são tensões internas, ou seja, não são causadas por ações externas, possuem resultantes de força e momento nulas.

Nos perfis laminados, as tensões normais residuais se originam dos seguintes fatos:

- o aço, quando se resfria, passando da temperatura de laminação para a temperatura ambiente, sofre uma redução de volume;
- certas partes da seção transversal, onde existe maior quantidade de material concentrado, passam da temperatura de laminação para a temperatura ambiente mais lentamente que outras, onde se tem menor quantidade de material concentrado.

As partes que se resfriam primeiro diminuem livremente de volume e passam a resistir à diminuição de volume daquelas partes que ainda permanecem aquecidas. Como consequência, quando o resfriamento é completado, aquelas partes que resfriaram primeiro ficam com tensões residuais de compressão e as partes que se resfriaram mais tarde ficam com tensões residuais de tração. A Figura 2.6 mostra a distribuição típica em um perfil laminado e também a distribuição em uma chapa com as bordas longitudinais laminadas.

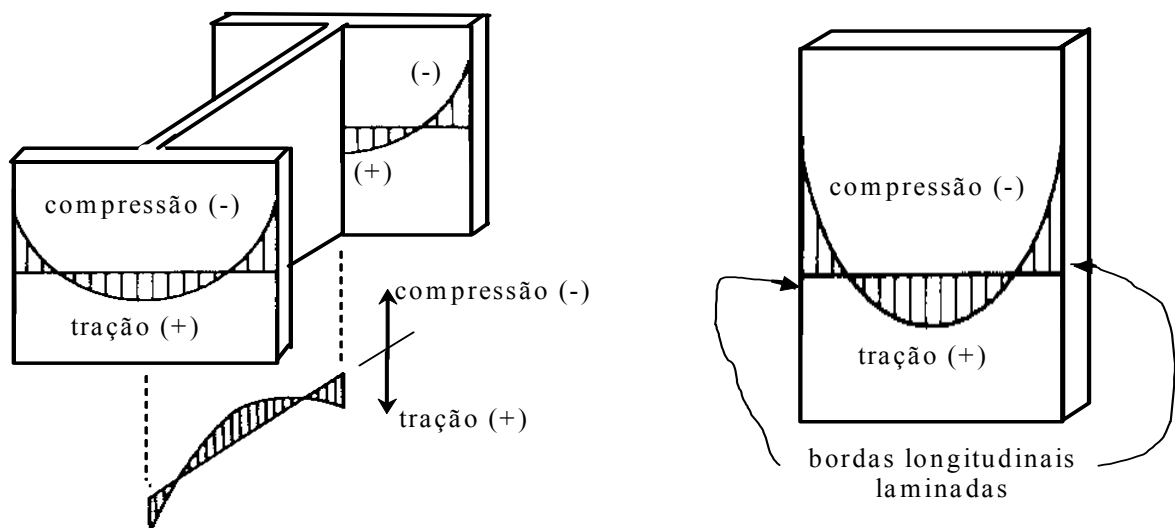


Figura 2.6 – Tensões normais residuais em perfil I laminado e em chapa laminada



A distribuição e a intensidade das tensões residuais na seção transversal de uma barra dependem de vários fatores, entre os quais as dimensões da seção transversal e a velocidade de resfriamento. Verifica-se que as regiões das extremidades das mesas e do centro da alma, nas quais existe menor quantidade de material concentrado, ficam comprimidas, e as regiões das junções entre alma e mesas, nas quais existe maior quantidade de material, ficam tracionadas.

No Brasil, para produção de perfis soldados, de modo geral, inicialmente cortam-se longitudinalmente as chapas a maçarico (no caso dos perfis de alma senoidal, são cortadas a maçarico as chapas das mesas). Logo, nesse primeiro procedimento, as regiões das bordas dessas chapas ficam mais aquecidas, têm o resfriamento completado por último, e ficam, portanto, tracionadas, ao passo que a região central fica comprimida. Em seguida, a soldagem com a chapa da alma aquece com mais intensidade as regiões próximas das soldas que, ao se resfriarem após todo o restante da seção, ficam tracionadas. A Figura 2.7 mostra as tensões normais residuais típicas em uma chapa após o corte das bordas longitudinais por maçarico e em um perfil I soldado.

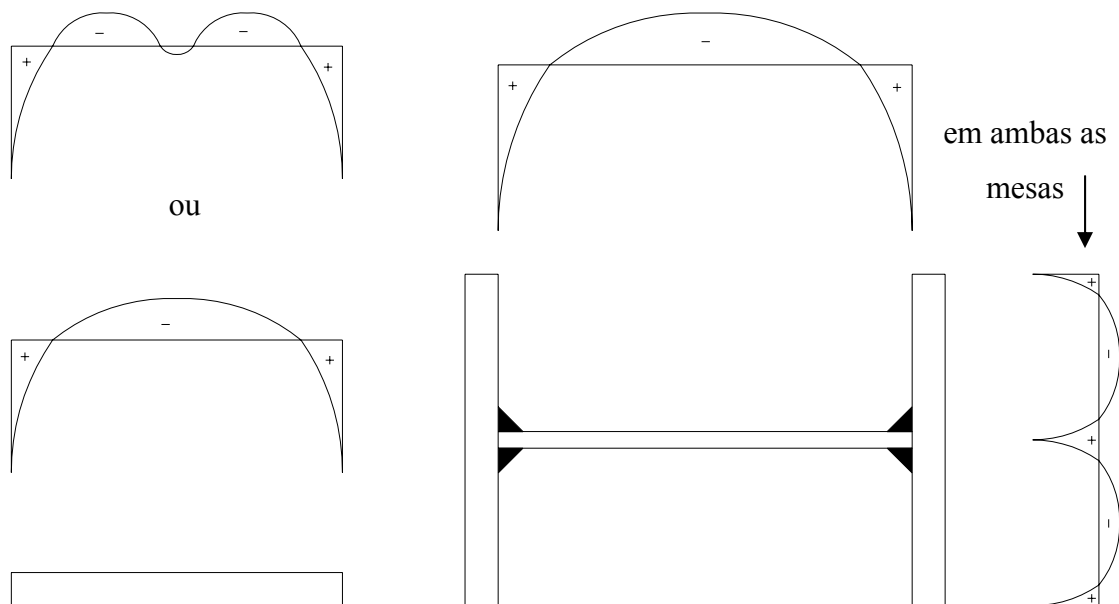


Figura 2.7 – Tensões normais residuais em chapa cortada a maçarico e em perfil I soldado

O texto-base de revisão da NBR 8800 (2005) adota, para efeito de dimensionamento estrutural, nos perfis soldados com chapas cortadas a maçarico uma tensão residual de compressão equivalente nas mesas de 70 MPa.

## 2.4. Métodos de Dimensionamento

### 2.4.1. Procedimento do ANSI/AISC 360-05 Adaptado para Vigas de Alma Senoidal

O procedimento para flambagem lateral com torção desenvolvido neste sub-item será denominado aqui AISC-SEN e trata-se de uma adaptação, para as vigas de alma senoidal de seção I duplamente simétrica e monossimétrica fabricadas no Brasil, da formulação do ANSI/AISC 360-05 (2005) produzida para vigas de alma plana. Essa adaptação consiste simplesmente em:

- desconsiderar a influência da alma nas propriedades geométricas da seção transversal;
- adotar um valor de tensão residual de compressão nas mesas de 70 MPa, levando-se em conta que as chapas planas desses elementos são cortadas a maçarico, conforme 2.3.

Consiste também em fazer um ajuste para obtenção de resultados confiáveis para consideração de cargas transversais atuantes em qualquer nível da seção transversal.

Com essas premissas, torna-se possível tratar conjuntamente as vigas com seções duplamente simétrica e monossimétrica. Assim, o momento fletor resistente,  $M_R$ , para a flambagem lateral com torção em regime elástico é dado por:

$$M_R = C_b \frac{\pi^2 E I_y}{L_b^2} \left\{ \frac{\beta_x}{2} + \sqrt{\left( \frac{\beta_x}{2} \right)^2 + \frac{C_w}{I_y} \left[ 1 + 0,039 \frac{I_t L_b^2}{C_w} \right]} \right\} \leq M_{plf} \quad (2.1)$$

com

$$\beta_x = 0,90 h_o \left( \frac{\alpha_{yf} - 1}{\alpha_{yf} + 1} \right) \quad (2.2)$$

e

$$\alpha_{yf} = \frac{I_{yfc}}{I_{yft}} \quad (2.3)$$

onde  $L_b$  é o comprimento destravado,  $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal do aço,  $I_y$  é o momento de inércia da seção transversal em relação ao eixo no plano médio da alma,  $I_t$  é o momento de inércia à torção,  $I_{yfc}$  e  $I_{yft}$  são respectivamente os momentos de inércia das mesas comprimida e tracionada em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma,  $C_w$  é a constante de empenamento da seção,  $h_o$  é a distância entre os centros geométrico das mesas e  $M_{plf}$  é o momento de plastificação da seção transversal, dado pela Equação (2.9). O fator  $C_b$ , conhecido como fator de momento equivalente, leva em conta a forma do diagrama de momento fletor, o grau de monossimetria da seção transversal e o nível de atuação das cargas transversais, é fornecido pela expressão aproximada:

$$C_b = \frac{12,5 M_{max}}{2,5 M_{max} + 3 M_A + 4 M_B + 3 M_C} R_m R_a \quad (2.4)$$

onde  $M_{max}$ ,  $M_A$ ,  $M_B$  e  $M_C$  são, respectivamente, os valores em módulo do momento fletor máximo no comprimento destravado, a um quarto, na metade e a três quartos desse comprimento.  $R_m$  é um parâmetro de monossimetria igual a 1,00 se o momento provoca curvatura simples e igual a:

$$R_m = 0,5 + 2 \left( \frac{I_{yfc}}{I_y} \right)^2 \quad (2.5)$$

se o momento provoca curvatura reversa (nota-se que mesmo nesta curvatura se a seção for simétrica em relação ao eixo de flexão,  $R_m$  é igual a 1,00). Por sua vez  $R_a$  é um coeficiente prático para levar em conta a atuação de cargas transversais em nível distinto da semi-altura da seção transversal, desenvolvido por Helwig *et al.* (1997), dado por:

$$R_a = 1,4^{\frac{2y}{h_o}} \quad (2.6)$$

onde  $y$  é a distância da semi-altura da seção transversal ao ponto de aplicação da carga (negativo para carga gravitacional acima da semi-altura e positivo para carga gravitacional abaixo da semi-altura). Esta expressão é válida desde que o grau de monossimetria, definido

como a relação entre o momento de inércia da mesa comprimida e de todo o perfil, em relação ao eixo no plano médio da alma, se situe entre 0,1 e 0,9.

Se o parâmetro de esbeltez da viga,  $\lambda$ , definido como a relação entre o comprimento destravado e o raio de giração da mesa comprimida em relação ao eixo que passa pelo plano médio da alma,  $r_{yfc}$ , for inferior ou igual ao parâmetro de esbeltez correspondente à plastificação da seção transversal,  $\lambda_p$ , com:

$$\lambda_p = \eta \sqrt{\frac{E}{f_{yf}}} \quad (2.7)$$

onde  $\eta$  é igual a 1,76 para as seções duplamente simétricas e 1,10 para as monossimétricas e  $f_{yf}$  é a resistência ao escoamento do aço das mesas, o colapso ocorre por plastificação total da seção transversal. Nesse caso, o momento fletor resistente é dado por:

$$M_R = M_{plf} \quad (2.8)$$

com

$$M_{plf} = A_{fc} f_{yf} h_o \leq A_{ft} f_{yf} h_o \quad (2.9)$$

onde  $A_{fc}$  e  $A_{ft}$  são, respectivamente, as áreas das mesas comprimida e tracionada.

Finalmente, se o parâmetro de esbeltez da viga for superior ao parâmetro correspondente à plastificação,  $\lambda_p$ , e inferior ou igual ao parâmetro de esbeltez correspondente ao início do escoamento,  $\lambda_r$ , com:

$$\lambda_r = \frac{1,38 E \sqrt{I_y I_t}}{\sigma_L W_{xc} r_{yfc}} \sqrt{\frac{2,6 \beta_x \sigma_L W_{xc}}{EI_t} + 1 + \sqrt{\left[ \frac{2,6 \beta_x \sigma_L W_{xc}}{EI_t} + 1 \right]^2 + \frac{27 C_w}{I_y} \left( \frac{\sigma_L W_{xc}}{EI_t} \right)^2}} \quad (2.10)$$

a flambagem ocorre em regime elastoplástico. Nessa, o momento fletor resistente é dado simplifcadamente pela seguinte expressão, que representa uma reta de transição:

$$M_R = C_b \left[ M_{plf} - (M_{plf} - M_{rf}) \left( \frac{\lambda - \lambda_p}{\lambda_r - \lambda_p} \right) \right] \leq M_{plf} \quad (2.11)$$

Nas expressões (2.10) e (2.11),  $\sigma_L$  é a tensão na qual se inicia o escoamento da mesa comprimida e  $M_{rf}$  é o momento fletor correspondente ao início do escoamento das mesas, dados por:

$$\sigma_L = f_{yf} - \sigma_{rf} \quad (2.12)$$

e

$$M_{rf} = (f_{yf} - \sigma_{rf}) W_{xc} \leq f_{yf} W_{xt} \quad (2.13)$$

onde  $\sigma_{rf}$  é a máxima tensão residual de compressão na mesa comprimida, tomada igual a 70 MPa, conforme já explicitado, e  $W_{xc}$  e  $W_{xt}$  são, respectivamente, os módulos de resistência elásticos relacionado às faces comprimida e tracionada da seção transversal.

A Figura 2.8 ilustra a variação da resistência nominal ao momento fletor  $M_n$  em função do índice de esbeltez  $\lambda$  e do valor de  $C_b$ .

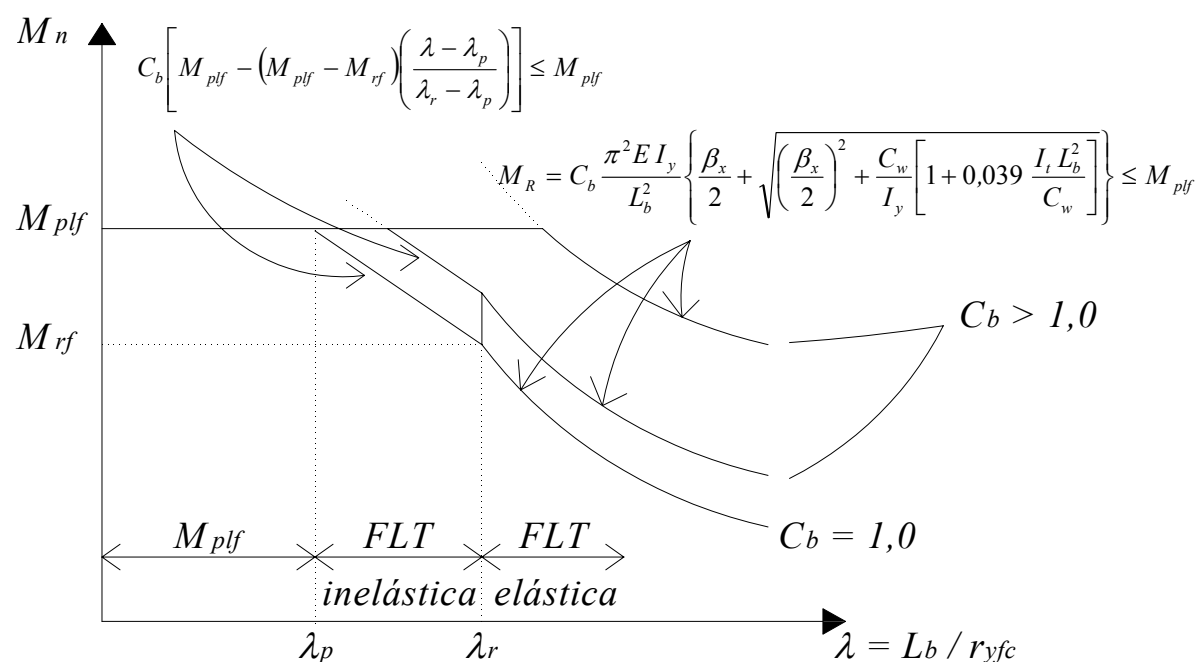


Figura 2.8 – Resistência nominal  $M_n$  em função do índice de esbeltez  $\lambda$  e de  $C_b$

### 2.4.2. Procedimento da Zeman

O método do DAST – Richtlinie 015 (1990), utilizado pela Zeman (1999) para vigas de alma senoidal tem como base o comportamento de treliça, pelo qual, numa primeira etapa, deve ser determinada a força axial resistente da mesa comprimida, suposta como barra isolada sujeita à instabilidade por flexão em relação a seu eixo de maior momento de inércia e, numa segunda etapa, a força obtida deve ser multiplicada pela distância entre os centros geométricos das mesas, levando ao valor do momento resistente. Considera-se, simplificadamente, que toda a tensão de compressão está concentrada na mesa e despreza-se o efeito de contenção lateral proporcionado pela alma.

Pelo procedimento, a força axial resistente da mesa comprimida deve ser calculada de acordo com a norma alemã DIN 18800 (1990), por meio da expressão:

$$N_{R,fc} = \frac{0,5}{\lambda_o} A_{fc} f_{yf} \leq A_{ft} f_{yf} \quad (2.14)$$

Nessa expressão,  $A_{fc}$  e  $A_{ft}$  são respectivamente as áreas da mesas comprimida e tracionada,  $f_{yf}$  a resistência ao escoamento do aço e  $\lambda_o$  o índice de esbeltez reduzido, dado por:

$$\lambda_o = \frac{1}{\pi} \frac{k_c L_b}{r_{yfc}} \sqrt{\frac{f_{yf}}{E}} \quad (2.15)$$

onde  $E$  é o módulo de elasticidade longitudinal do aço,  $L_b$  o comprimento destravado,  $r_{yfc}$  o raio de giração da mesa comprimida em relação a seu eixo de maior momento de inércia e  $k_c$  um coeficiente ligado à instabilidade, dado pela Figura 2.9. Uma observação mais detalhada do valor desse coeficiente permite concluir que o mesmo corresponde ao inverso da raiz quadrada do fator de momento equivalente  $C_b$  adotado no projeto de vigas.

Varição da força axial de compressão				
Coeficiente $k_c$	1,00	0,94	0,86	$1/(1,33-0,33\psi)$

Figura 2.9 – Coeficiente de instabilidade por força axial de compressão

O momento resistente à flambagem da mesa comprimida é finalmente dado por:

$$M_R = N_{R,fc} h_o \quad (2.16)$$

onde  $h_o$  é a distância entre os centros geométricos das mesas comprimida e tracionada.

### 3. ANÁLISE NUMÉRICA

#### 3.1. Generalidades

A análise numérica foi feita pelo Método dos Elementos Finitos, empregando o módulo de análise de flambagem pelo problema de autovalor (*Eigenvalue Buckling Analysis*) do programa ANSYS 9.0 (2004), conforme será descrito em 3.2. As vigas foram modeladas com elementos retangulares de casca *Shell 63* de quatro nós, com seis graus de liberdade (três translações e três rotações) por nó, exceto nas mesas, na junção com a alma senoidal, onde foram necessários elementos triangulares de três nós. O número de elementos retangulares foi de aproximadamente 2100 e o de elementos triangulares de aproximadamente 100 a cada 1085 mm de comprimento de viga. A Figura 3.1 ilustra a malha típica de elementos finitos.

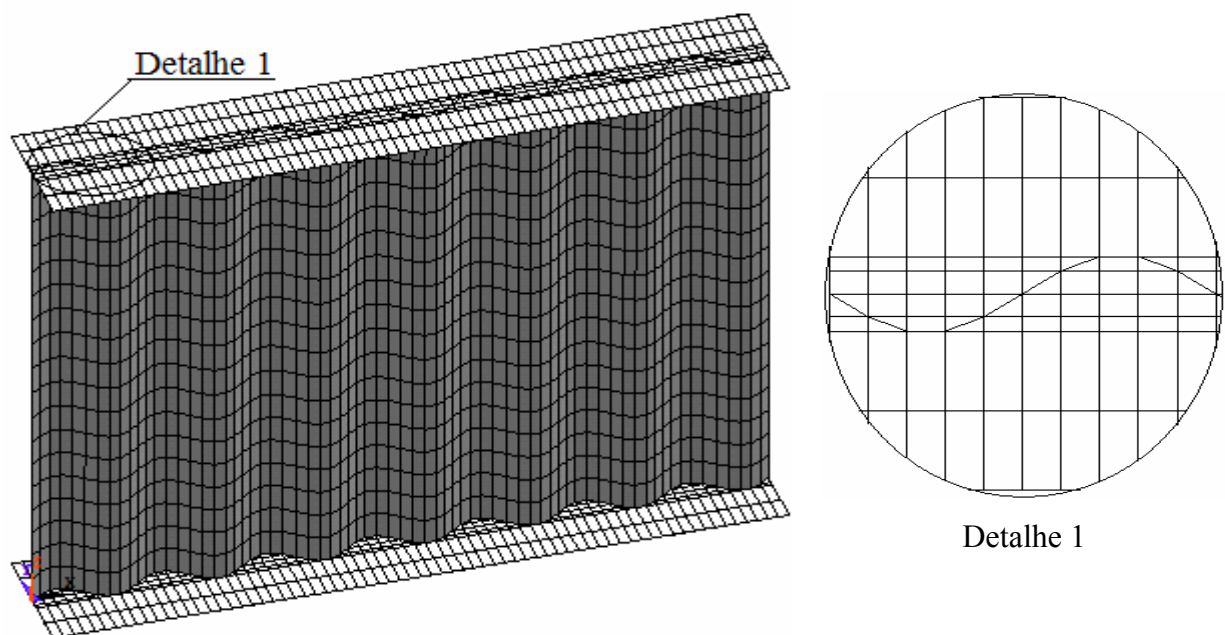


Figura 3.1 – Malha típica de elementos finitos

#### 3.2. Uso do ANSYS para a Análise Linearizada de Flambagem

Considerando desprezáveis os deslocamentos que precedem à carga crítica, a determinação dessa carga de um sistema elástico pode ser feita de forma simplificada. Assim, as equações



de equilíbrio não-lineares podem ser parcialmente linearizadas, em um processo que conduz ao problema clássico do autovalor da estabilidade.

Conforme Calenzani *et al.* (2005), a análise linearizada de flambagem, como é conhecido o método de análise de estabilidade pelo problema de autovalor que ignora os deslocamentos antes da flambagem, apresenta a forma:

$$([K] + [K_G])[z_i] = [0] \quad (3.1)$$

sendo  $[K]$  a matriz de rigidez do sistema,  $[K_G]$  a matriz de rigidez geométrica e  $[z_i]$  o enésimo autovetor. A matriz de rigidez geométrica é dada por:

$$[K_G] = \lambda_i [S] \quad (3.2)$$

onde  $\lambda_i$  é o enésimo autovalor e  $[S]$  a matriz que simula a tendência de a distribuição de tensões iniciar a flambagem considerando as deformações de segunda ordem.

As Equações (3.1) e (3.2) decorrem do critério de que, na instabilidade, a matriz de rigidez tangente, dada pela soma entre as matrizes  $[K]$  e  $[K_G]$ , deve ser singular, ou seja:

$$\det[K_i] = \det[K + K_G] = 0 \quad (3.3)$$

No ANSYS 9.0 (2004), bem como em outros programas que usam o Método dos Elementos Finitos, a análise linearizada de flambagem adota as etapas sintetizadas a seguir:

- 1) Construção do modelo;
- 2) Resolução do sistema linear estático da equação seguinte para obtenção da distribuição das forças internas:

$$[K][u] = [f] \quad (3.4)$$

onde  $[u]$  é o vetor dos deslocamentos nodais e  $[f]$  é um vetor análogo ao vetor de forças nodais  $[F]$  do sistema, entretanto com suas componentes com valor unitário;

- 3) Determinação da matriz de rigidez geométrica  $[K_G]$  a partir da distribuição das forças internas;
- 4) Resolução do problema de autovalor reescrito na equação:

$$([K] + \lambda_i [S])[z_i] = 0 \quad (3.5)$$

por meio de extração modal, realizada por métodos especiais que se beneficiam da dispersão das matrizes  $[K]$  e  $[S]$ , tais como o de iteração por subespaço e o de Lanczos;

- 5) O autovalor  $\lambda_i$  mais próximo de zero será o multiplicador da carga crítica e o autovetor associado  $z_i$  fornece o correspondente modo de flambagem.

### 3.3. Casos Estudados

O trabalho tomou como base nove casos de vigas de somente um vão, considerado totalmente sem contenção à flambagem lateral com torção, envolvendo diferentes carregamentos e condições de contorno no plano de flexão, mostrados na Figura 3.2.

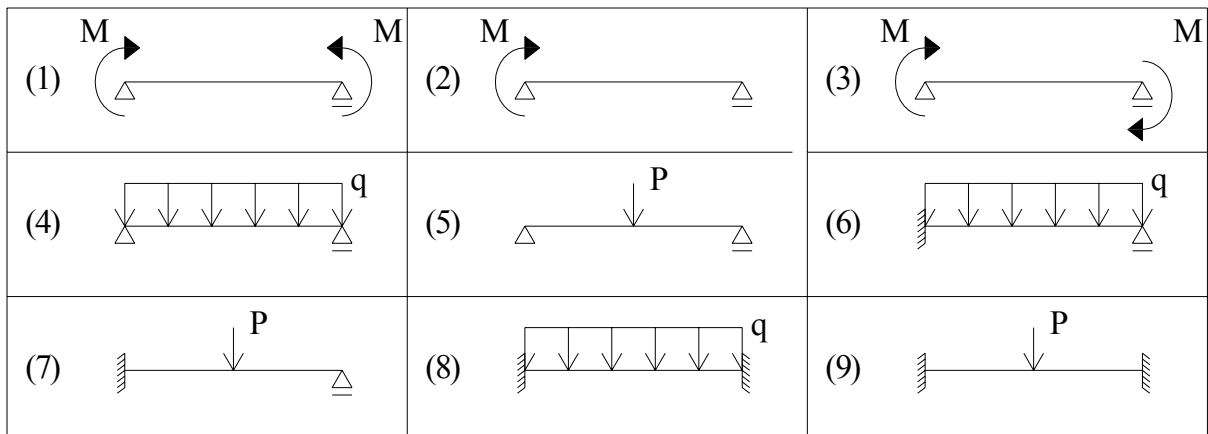


Figura 3.2 – Casos de vigas considerados

Os carregamentos foram escolhidos de modo a representar situações extremas ou próximas dessas, do comportamento das vigas, permitindo a obtenção de resultados representativos. Por exemplo, a atuação do momento uniforme (caso 1) indica a condição mais desfavorável para a flambagem lateral com torção, ao passo que momentos iguais de sinais contrários (caso 3) uma situação bastante favorável (o caso 2 representa uma situação intermediária entre os dois citados). Da mesma forma para cargas transversais, o limite mais desfavorável é a carga distribuída (casos 4, 6 e 8) e o mais favorável a carga concentrada na seção central (casos 5, 7 e 9). As cargas transversais serão supostas em três níveis distintos, na meia-altura, na face superior e face inferior da seção transversal, conforme indicado na Figura 3.3.

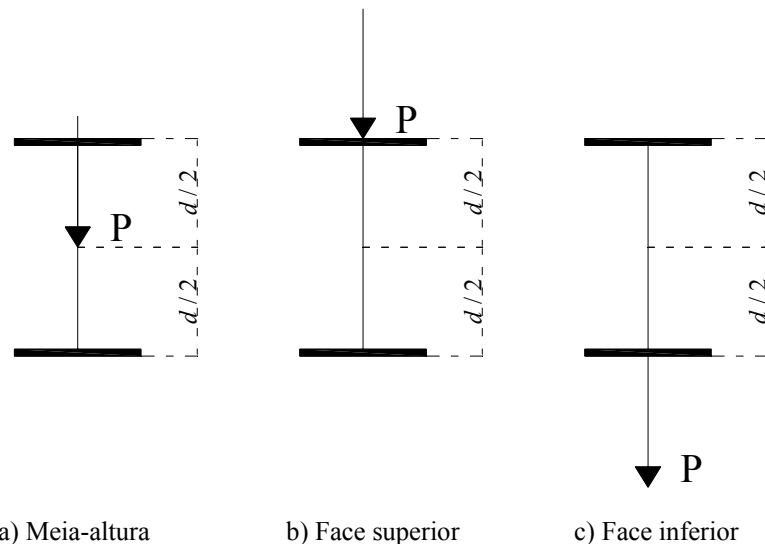


Figura 3.3 – Níveis de aplicação das cargas transversais na seção transversal das vigas estudadas

As condições de contorno abrangem todas as possibilidades, apoios rotulados nas duas extremidades (casos 4 e 5), uma extremidade rotulada e outra engastada (casos 6 e 7) e duas extremidades engastadas (casos 8 e 9).

Todas as vigas foram consideradas com vínculos de garfo nas extremidades, como é usual nas normas de projeto, por significar a condição mais desfavorável de vinculação para efeito de torção. Na simulação dos apoios rotulados com vínculos de garfo, todos os nós das extremidades da viga tiveram os deslocamentos vertical e lateral impedidos e o deslocamento longitudinal (na direção do eixo da viga) liberado. Na simulação dos apoios engastados com vínculo de garfo, todos os nós da extremidade da viga tiveram os deslocamentos vertical e lateral impedidos, bem como o deslocamento longitudinal dos nós na junção das mesas com a alma (para os demais nós o deslocamento longitudinal foi liberado). A Figura 3.4 ilustra as

condições de contorno para o apoio rotulado com vínculo de garfo e para apoio engastado com vínculo de garfo.

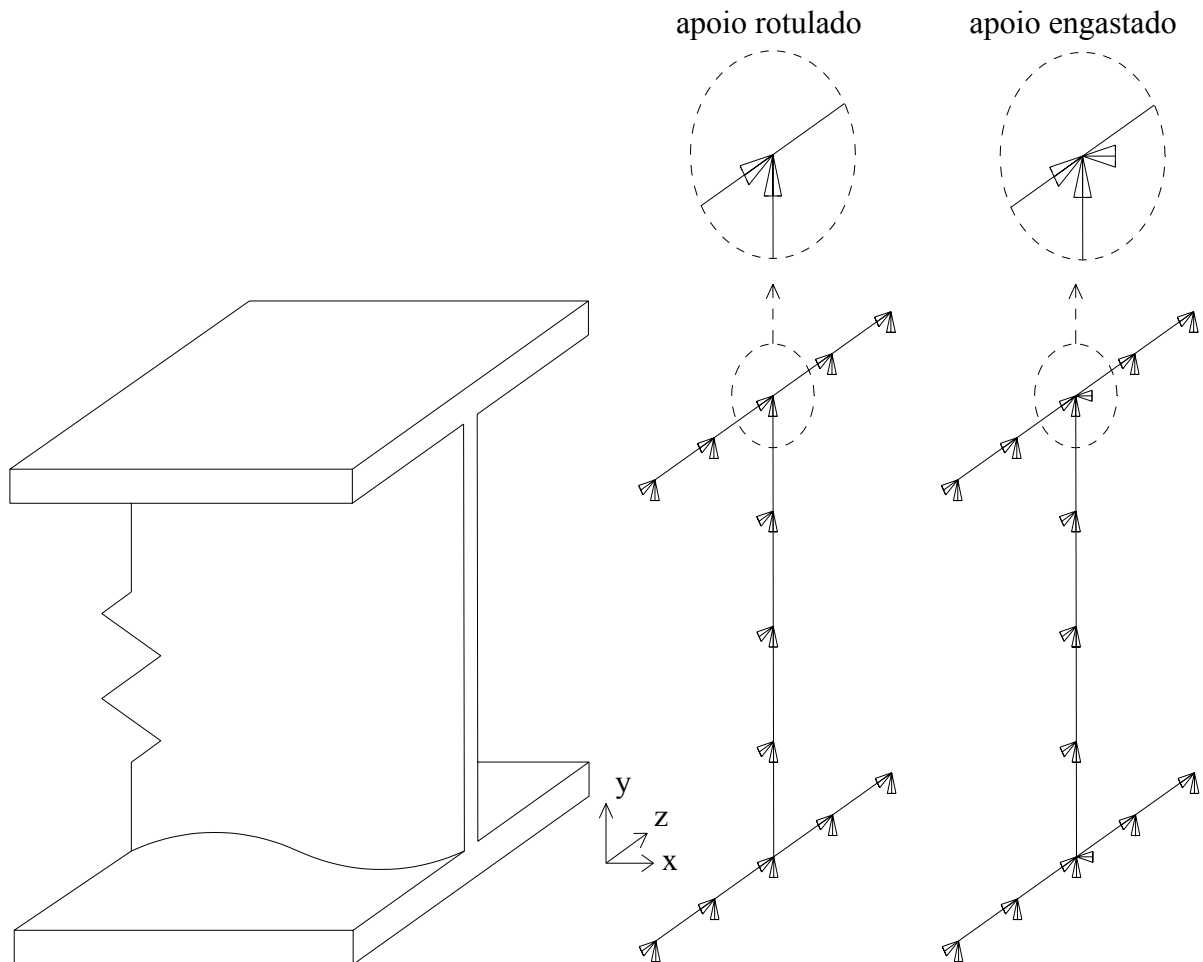


Figura 3.4 – Condições de contorno

### 3.4. Vigas Estudadas

Foram feitas análises, para a obtenção do momento crítico elástico, em duas vigas, mostradas na Figura 3.5; a primeira com seção I duplamente simétrica com altura da alma de 800 mm, mesas de largura de 200 mm e espessura de 9,5 mm e alma senoidal de espessura de 2 mm e geometria conforme a Figura 1.9, e a segunda viga com seção I monossimétrica, em que apenas se aumentou a espessura de uma das mesas para 16 mm. As vigas foram consideradas com eixo reto, tendo sido tomados quinze vãos, todos múltiplos ao comprimento de uma onda senoidal (155 mm), variando na faixa de 3,10 m até 20,15 m, com incrementos da ordem de 1 m.

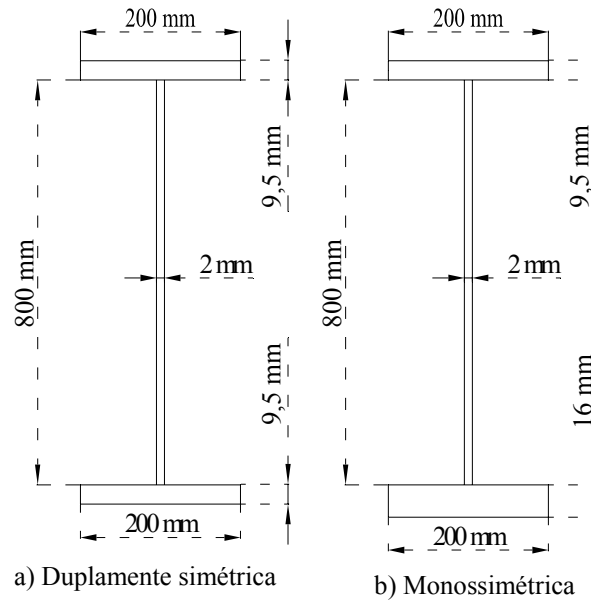


Figura 3.5 – Dimensões das vigas estudadas

Na viga de seção I monossimétrica a seção transversal foi disposta em duas posições distintas:

- Posição A – mesa de menor espessura (9,5 mm) disposta como mesa superior;
- Posição B – mesa de maior espessura (16 mm) disposta como mesa superior.

A Figura 3.6 apresenta as duas posições como a seção transversal da viga monossimétrica foi disposta.

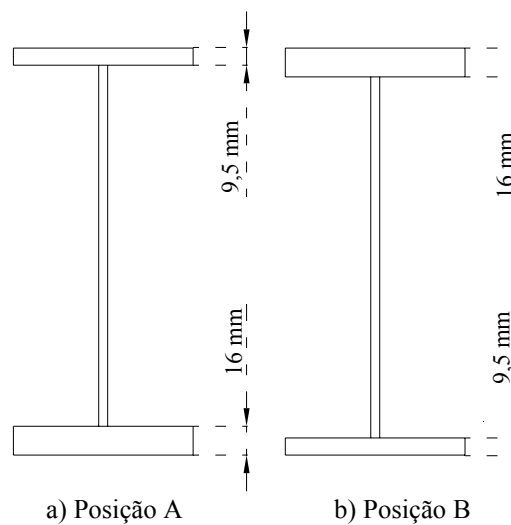


Figura 3.6 – Posições como a seção transversal da viga monossimétrica foi disposta

No caso 3 não há a necessidade de desdobramento em duas posições distintas, pois o resultado do momento resistente é o mesmo independente da forma como a seção transversal for disposta, devido ao fato de os momentos aplicados nas extremidades do vão da viga ter valores iguais e opostos. Nos casos 1, 2, 4 e 5 o desdobramento em duas posições causa compressão na mesa de menor espessura quando a seção transversal for considerada na Posição A e compressão na mesa de maior espessura na Posição B.

## 4. RESULTADOS E AVALIAÇÃO DOS PROCEDIMENTOS DE PROJETO

### 4.1. Generalidades

Para as vigas estudadas, foram calculados os valores do momento resistente,  $M_R$ , em função do comprimento destravado  $L_b$  (sempre igual ao vão), utilizando o procedimento AISC-SEN, conforme o sub-item 2.4.1, e o procedimento da Zeman (1999), conforme 2.4.2. Esses valores foram comparados com os obtidos numericamente, pelo método dos elementos finitos via programa ANSYS 9.0 (2004) e estão apresentados nos sub-itens 4.2 e 4.3, respectivamente para as vigas de seção I duplamente simétrica e monossimétrica. Ainda em anexo encontram-se tabelas com os valores dos momentos resistentes obtidos pelo ANSYS (2004), pelo AISC-SEN e pelo procedimento utilizado pela Zeman (1999).

O módulo de elasticidade do aço ( $E$ ) foi tomado com seu valor convencional de 205000 MPa, a resistência do aço das mesas ( $f_{yf}$ ) igual a 350 MPa (ver sub-item 1.5) e a tensão residual igual a 70 MPa (ver sub-item 2.3).

### 4.2. Viga de Seção Duplamente Simétrica

Na viga de seção I duplamente simétrica analisada, com dimensões mostradas na Figura 3.5.a, foram realizados três estudos. Em um primeiro estudo, cujos resultados são mostrados no sub-item 4.2.1, foram aplicados momentos (casos 1, 2, 3 – ver Figura 3.2) e cargas transversais (casos 4, 5, 6, 7, 8, 9 – ver Figura 3.2) dispostas na meia-altura da seção transversal, que coincide com o centro de torção. Em seguida, com os resultados apresentados no sub-item 4.2.2, as cargas transversais (casos 4 a 9 – ver Figura 3.2) foram dispostas na face inferior da seção transversal da viga (cargas estabilizantes). Finalmente, com os resultados fornecidos no sub-item 4.2.3, as cargas transversais foram aplicadas na face superior da seção transversal da viga (cargas desestabilizantes).

#### 4.2.1. Momentos e Cargas Transversais Aplicadas na Meia-Altura da Seção Transversal

Os valores de  $M_R$ , calculados pelos procedimentos AISC-SEN e da Zeman (1999), encontram-se nas Figuras 4.1 a 4.9, respectivamente para os casos 1 a 9 indicados na Figura 3.2, e também os resultados fornecidos pelo programa ANSYS 9.0 (2004) para os comprimentos da viga em que a flambagem ocorre no regime elástico delimitado pelo procedimento AISC-SEN.

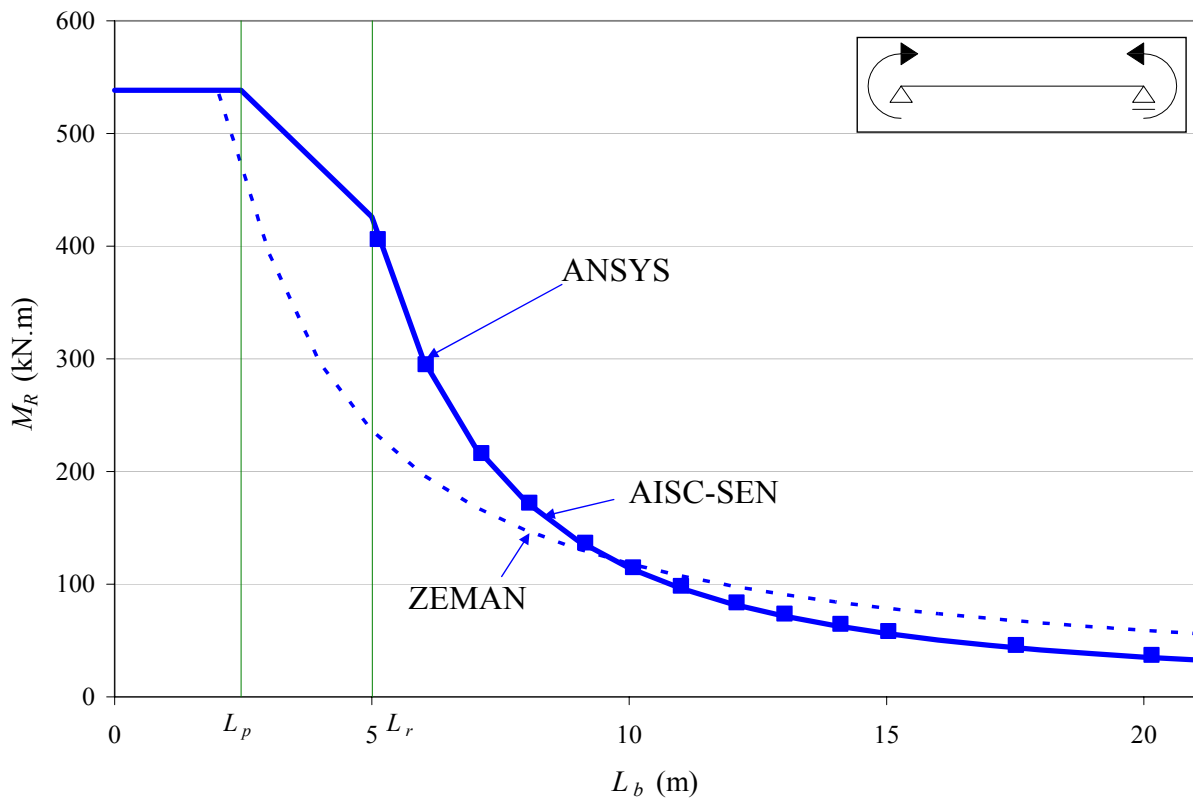


Figura 4.1 – Valores de  $M_R$  para o caso 1 na seção I duplamente simétrica



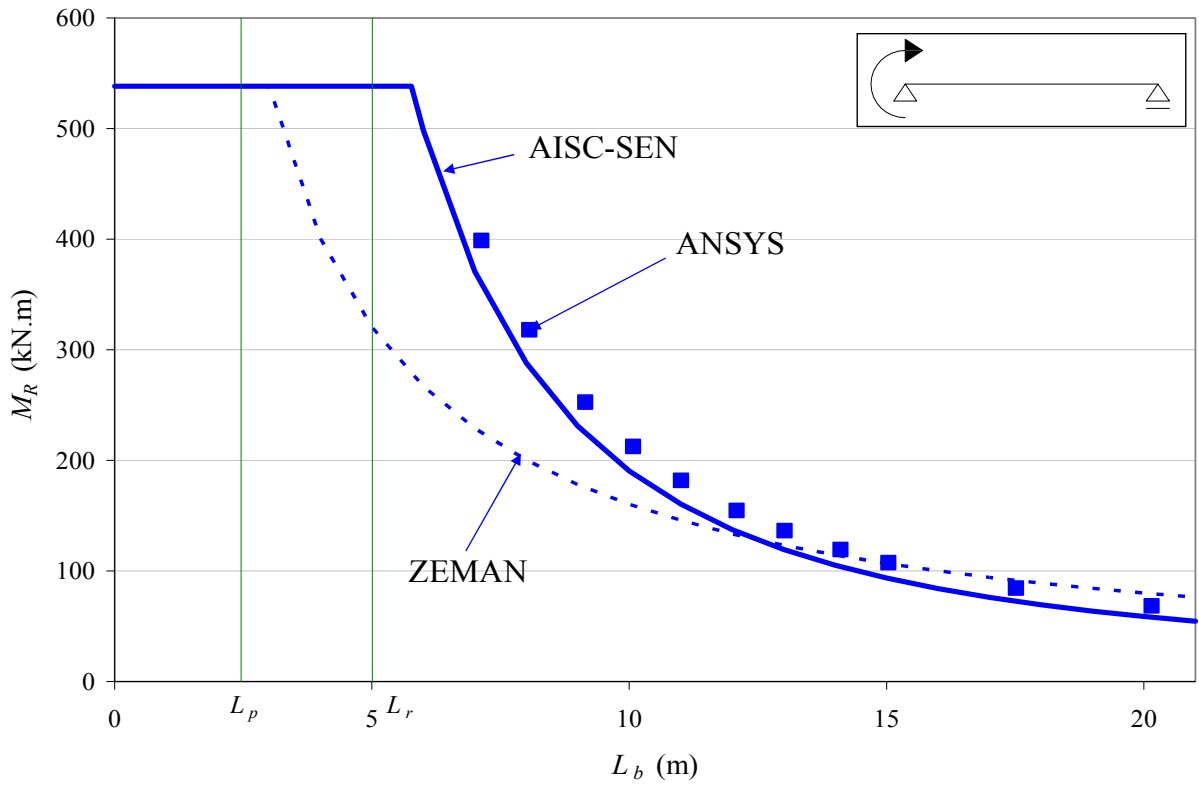


Figura 4.2 – Valores de  $M_R$  para o caso 2 na seção I duplamente simétrica

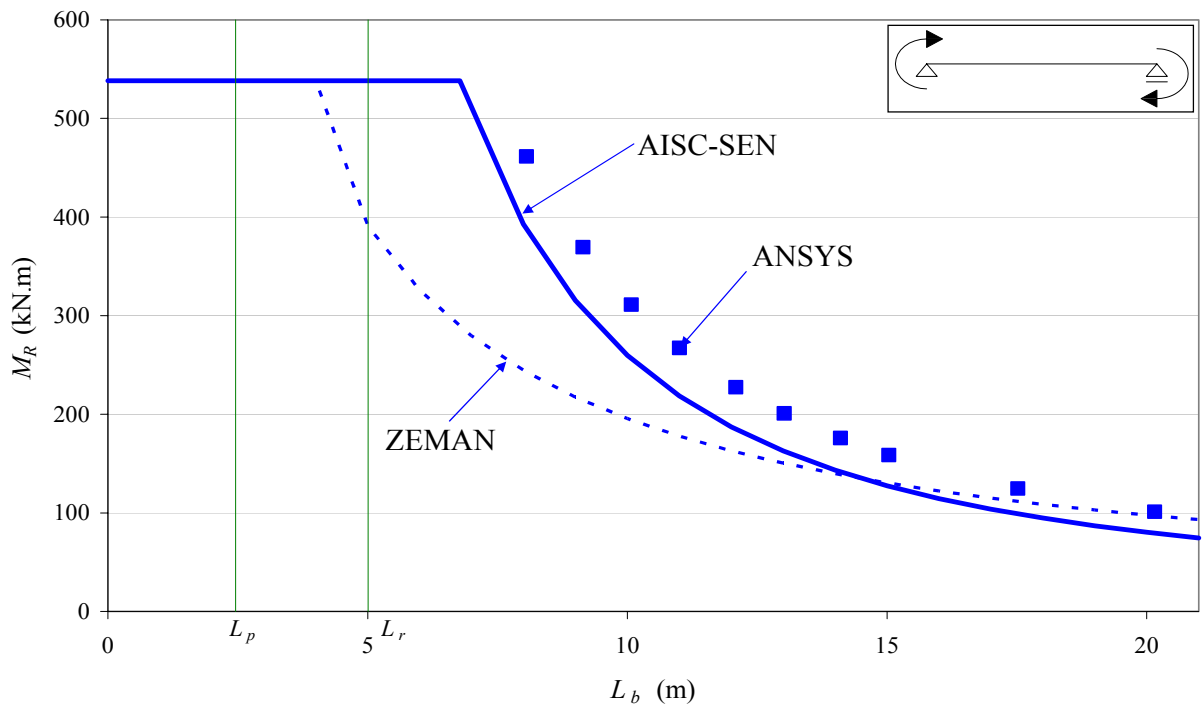


Figura 4.3 – Valores de  $M_R$  para o caso 3 na seção I duplamente simétrica

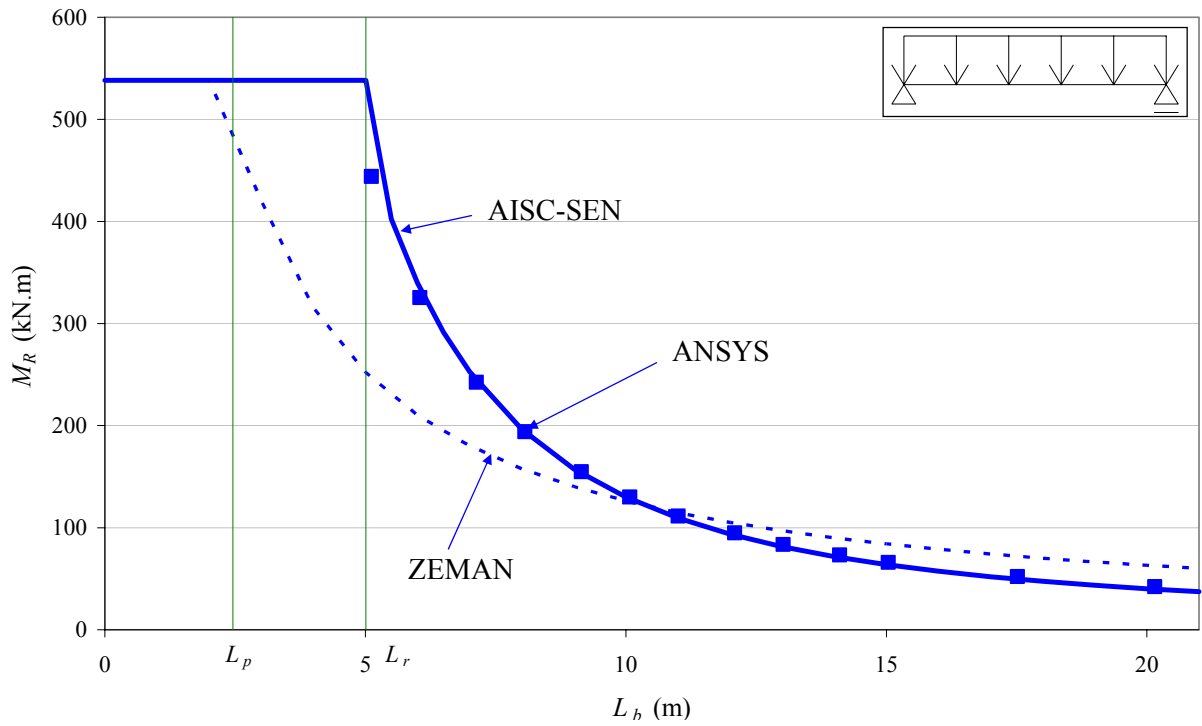


Figura 4.4 – Valores de  $M_R$  para o caso 4 e seção I duplamente simétrica com cargas na meia-altura da seção transversal

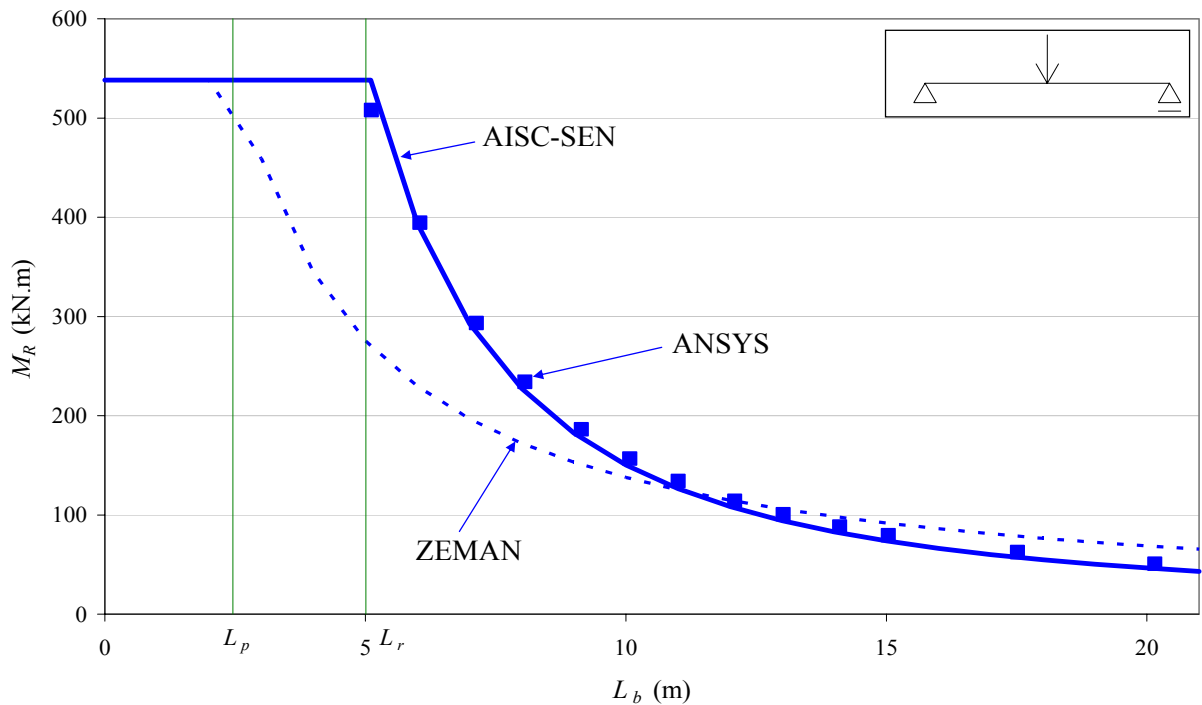


Figura 4.5 – Valores de  $M_R$  para o caso 5 e seção I duplamente simétrica com cargas na meia-altura da seção transversal

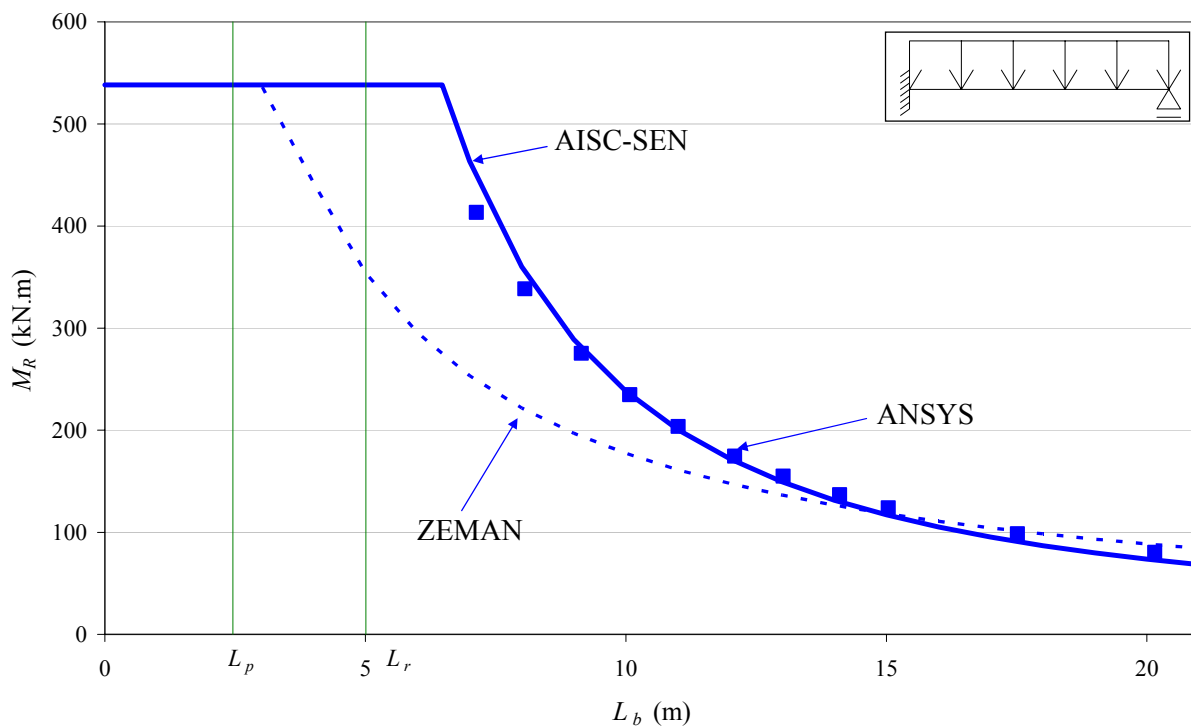


Figura 4.6 – Valores de  $M_R$  para o caso 6 e seção I duplamente simétrica com cargas na meia-altura da seção transversal

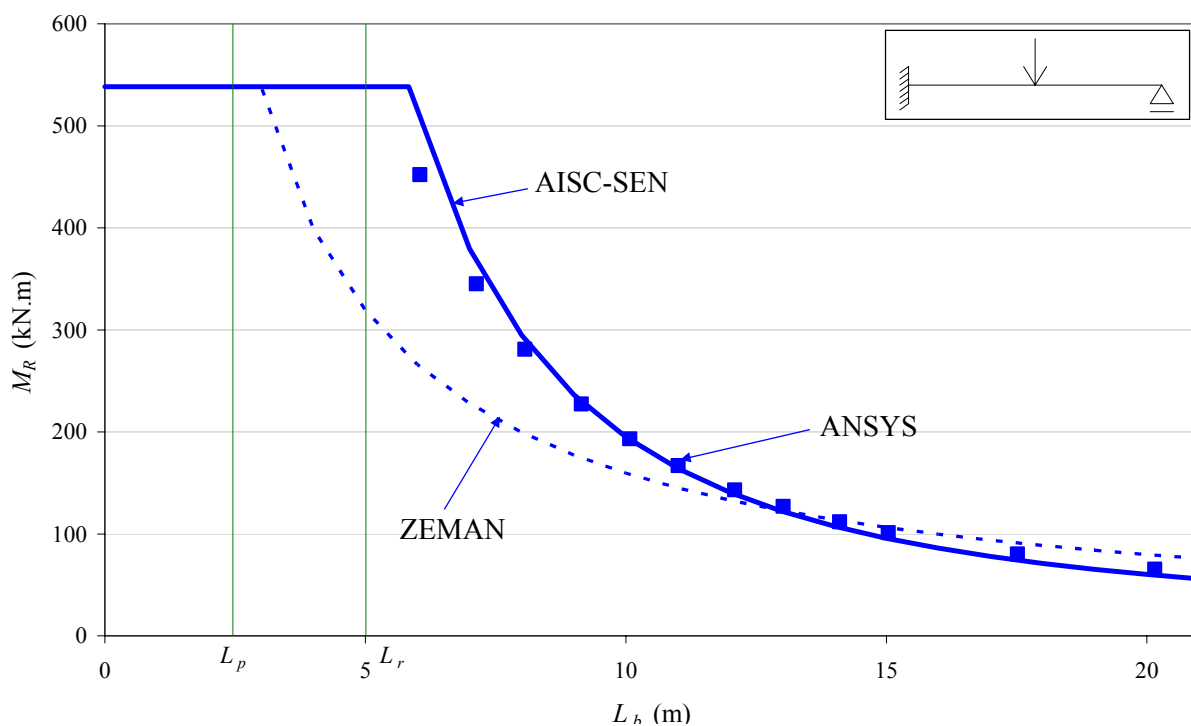


Figura 4.7 – Valores de  $M_R$  para o caso 7 e seção I duplamente simétrica com cargas na meia-altura da seção transversal

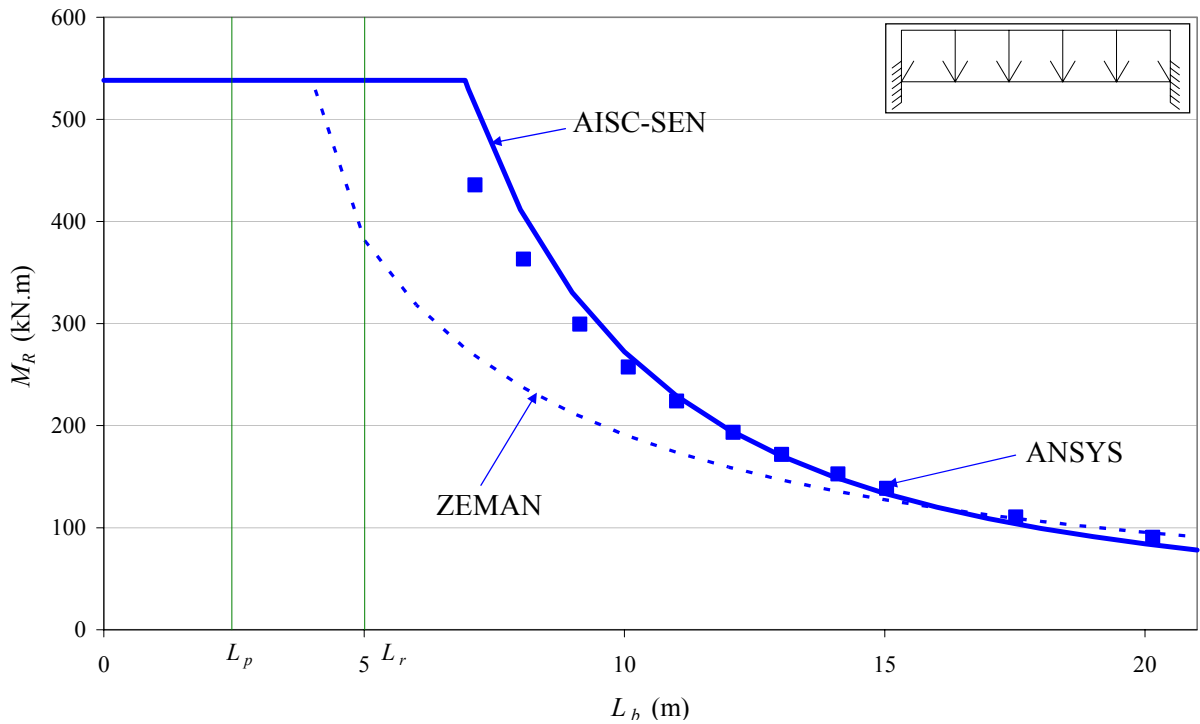


Figura 4.8 – Valores de  $M_R$  para o caso 8 e seção I duplamente simétrica com cargas na meia-altura da seção transversal

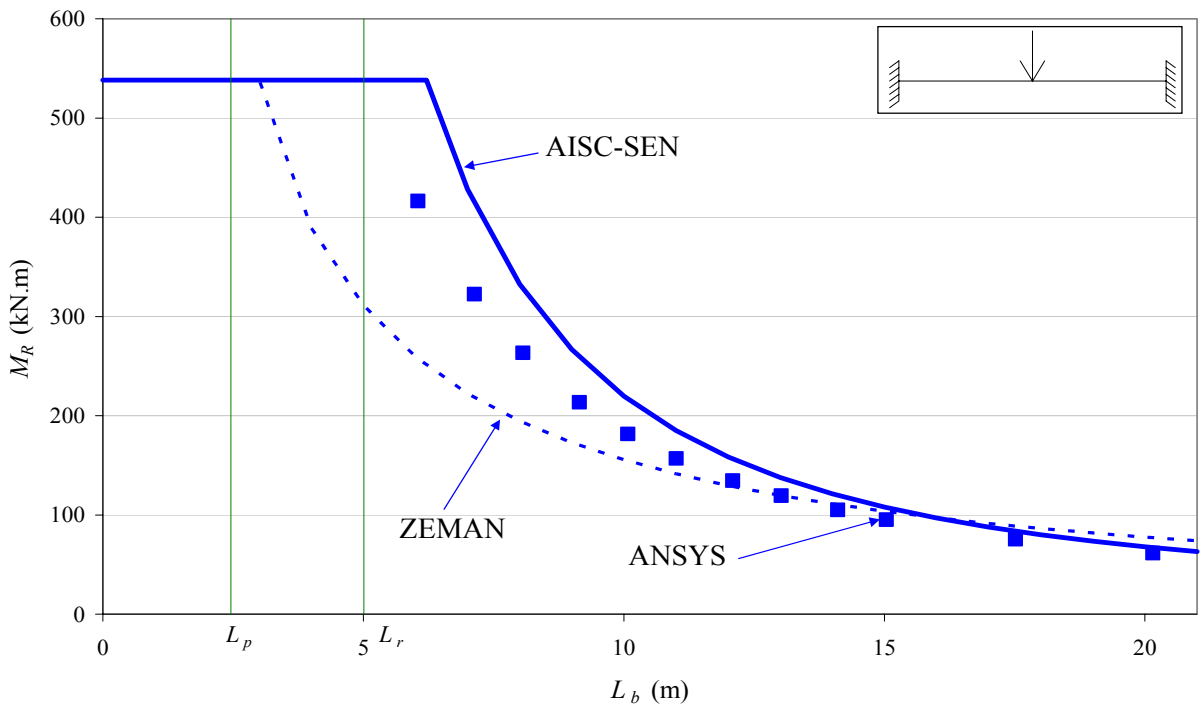


Figura 4.9 – Valores de  $M_R$  para o caso 9 e seção I duplamente simétrica com cargas na meia-altura da seção transversal

Observa-se que o procedimento simplificado da Zeman (1999) apresenta momentos resistentes superiores aos do ANSYS 9.0 (2004), e também aos do AISC-SEN, para os

maiores comprimentos destravados em todos os casos de carregamento considerados, levando a resultados contrários à segurança, quando comparados com os resultados numéricos. Já para os menores comprimentos, o procedimento da Zeman (1999) apresenta momentos resistentes inferiores, com resultados favoráveis à segurança. Isso se deve ao fato de a curva de resistência à compressão da DIN 18800 (1990), utilizada pela Zeman (1999), fornecer valores exageradamente elevados para a força resistente de compressão da mesa para altas esbeltezes e muito reduzidos para baixas esbeltezes. Apesar disso, obviamente, para vigas com seção transversal de pequena altura, em virtude da diminuição do braço de alavanca, os valores obtidos pelo procedimento da Zeman (1999) se reduzem bastante, podendo se tornar inferiores aos dos dois outros métodos também para grandes vãos. Ao contrário, para vigas com seção transversal de grande altura, o procedimento da Zeman (1999) pode conduzir a valores sempre superiores aos dos outros métodos.

Esclarece-se que o modelo de treliça, para representar com segurança a flambagem lateral com torção de vigas, deve usar um processo de determinação da resistência de barras comprimidas compatível. Se, por exemplo, fosse usada, ao invés da curva de resistência da DIN 18800 (1990), a curva de barras comprimidas do Eurocode 3 (2003) ou de outra norma qualquer, deveria ser empregado um coeficiente de flambagem igual ao inverso da raiz quadrada do fator  $C_b$ , o que corresponde obter o momento resistente considerando nulo o momento de inércia à torção da seção transversal. O uso de um coeficiente de flambagem próprio de barras comprimidas, levando em conta a variação da força axial de compressão na mesa ao longo do vão, é perigosa, pois eleva a resistência à compressão em proporção muito superior à que a variação do momento fletor eleva a resistência das vigas à flambagem lateral com torção, como pode ser facilmente demonstrado. No procedimento da Zeman (1999), apesar de a curva de resistência da DIN 18800 (1990) não ter se mostrado adequada, a questão do uso do coeficiente de flambagem compatível é contemplada.

O procedimento AISC-SEN apresenta resultados muito próximos dos obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004) nos casos 1, 4, 5, 6, 7 e 8. Nos casos 2 e 3, o procedimento mostra-se conservador, tendo como razão o fato de o valor de  $C_b$ , dado pela Equação (2.4), ser aproximado. Nestes casos, se fossem usados valores mais precisos de  $C_b$ , como os fornecidos por Reis (1996), os momentos resistentes do procedimento AISC-SEN seriam superiores ( $C_b$  mais preciso igual a 1,84 contra o valor de 1,67 para o caso 2 e 2,74 versus o valor usado de 2,27 para o caso 3), praticamente coincidindo com os valores do ANSYS 9.0 (2004). Tal fato pode ser

comprovado pelas Figuras 4.10 e 4.11, que apresentam, respectivamente para os casos 2 e 3, os resultados obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004) e pelo procedimento AISC-SEN, usando o coeficiente  $C_b$  fornecido por Reis (1996).

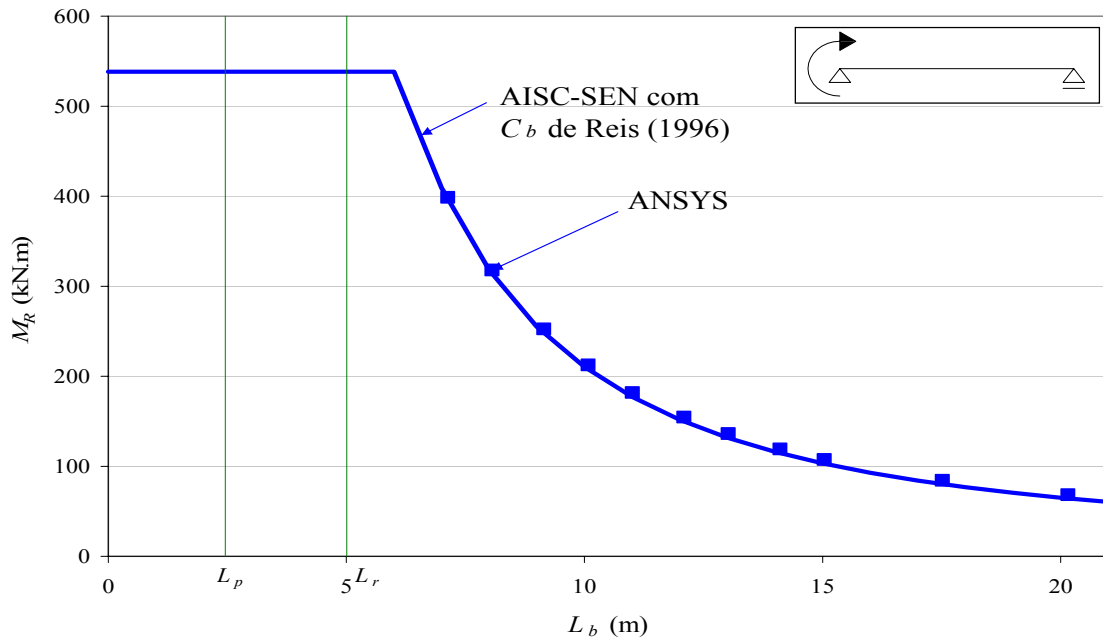


Figura 4.10 – Comparação do caso 2 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado por Reis (1996) com ANSYS 9.0 (2004)

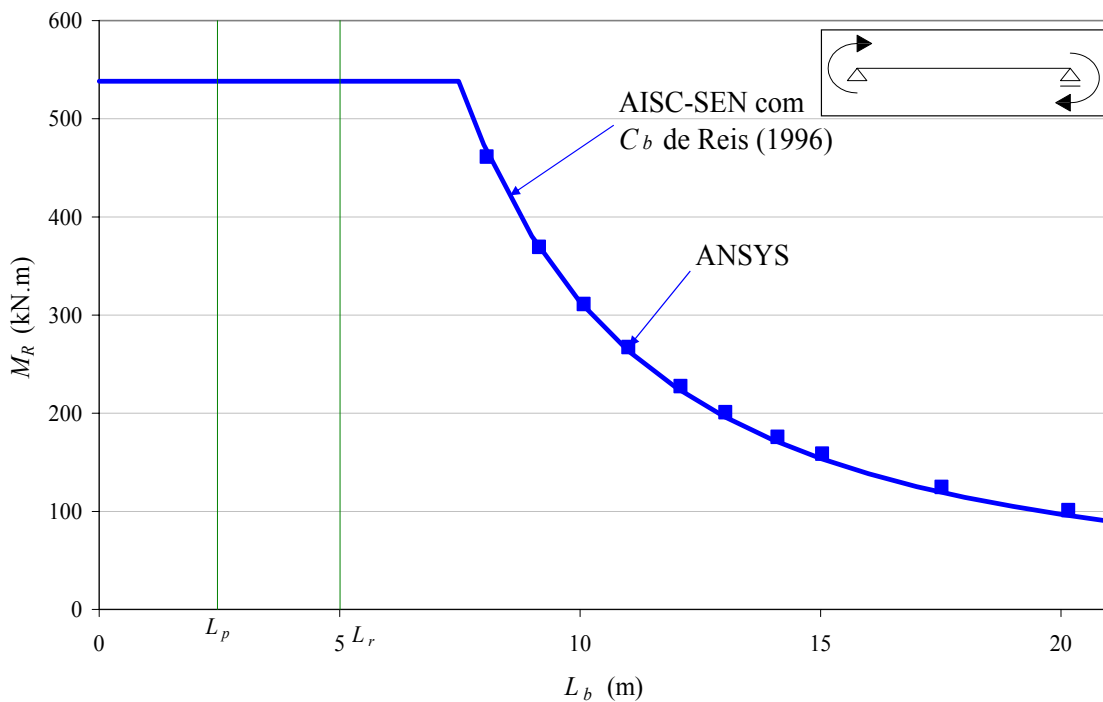


Figura 4.11 – Comparação do caso 3 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado por Reis (1996) com ANSYS 9.0 (2004)

No caso 9, o fato de o procedimento AISC-SEN ter apresentado resultados contrários à segurança, se deve também, ao fato do valor de  $C_b$  dado pela Equação (2.4) ser aproximado. Usando o valor de  $C_b$ , fornecido em Reis (1996), igual a 1,72 ao invés do valor de 1,92 da Equação (2.4), os resultados do procedimento AISC-SEN tornam-se mais próximos dos obtidos numericamente pelo ANSYS 9.0 (2004), como pode ser observado na Figura 4.12.

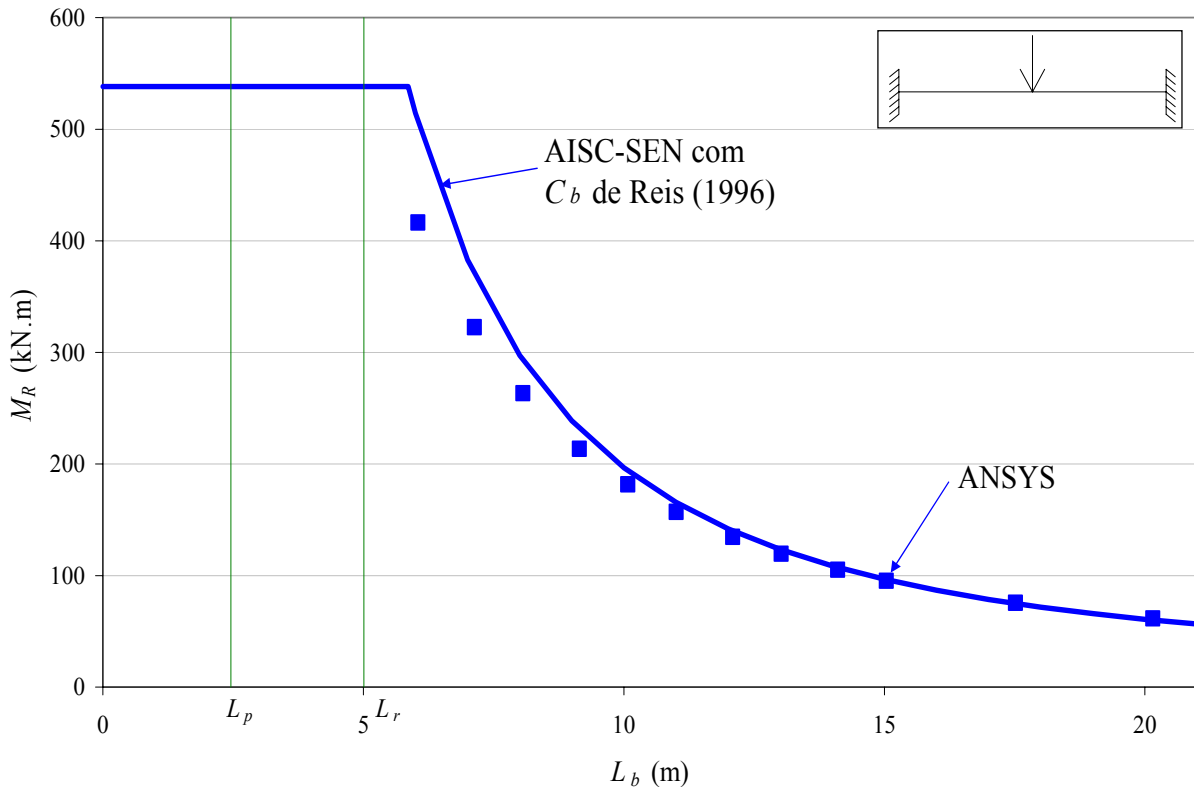


Figura 4.12 – Comparação do caso 9 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado por Reis (1996) com ANSYS 9.0 (2004) com cargas na meia-altura da seção transversal

Verifica-se que, à medida que o vão da viga diminui, a relação entre os momentos resistentes obtidos pelo programa ANSYS 9.0 (2004) e pelo AISC-SEN também se reduz, chegando a ser inclusive ligeiramente inferior a 1,00. A principal razão para isso é que, para vãos menores, a distorção da alma na flambagem, ilustrada na Figura 4.13, que não é prevista pelo procedimento AISC-SEN, se torna mais pronunciada, diminuindo o valor do momento resistente (Figura 4.12). Essa influência, observada neste trabalho nas vigas de alma senoidal, ocorre também nas vigas de alma plana, conforme Ma & Hughes (1996), Hughes & Ma (1996) e Samanta & Kumar (2005). Em termos práticos, a distorção da alma, não costuma ser considerada nas normas de projeto, pois quando a mesma se torna significativa, a instabilidade não mais ocorre em regime elástico. A desconsideração da alma nas

propriedades geométricas da seção transversal no procedimento AISC-SEN, especialmente do momento de inércia à torção,  $I_t$ , também contribui para tornar a relação menor. Nos grandes vãos,  $I_t$  influi mais nos resultados, elevando mais o momento resistente que nos vãos reduzidos, o que é devidamente captado pelo programa ANSYS 9.0 (2004).

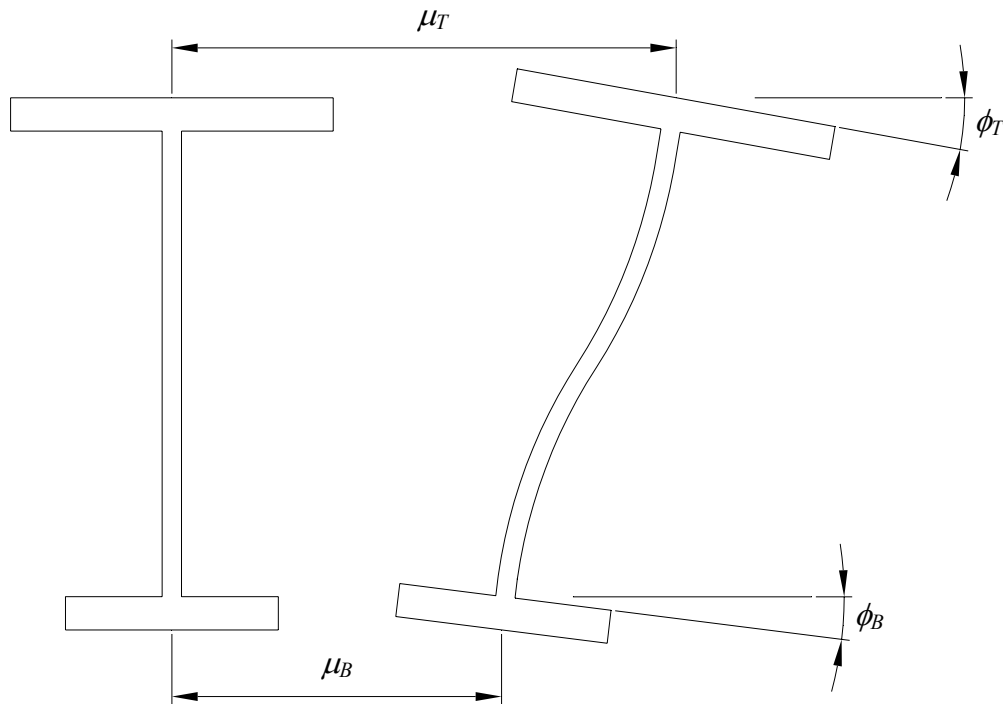


Figura 4.13 – Distorção da alma na flambagem

#### 4.2.2. Cargas Transversais Aplicadas na Face Inferior (Estabilizantes)

As Figuras 4.14 a 4.19 mostram, respectivamente para os casos 4 a 9 (Figura 3.2), os valores de  $M_R$ , calculados pelos procedimentos AISC-SEN, da Zeman (1999) e também os resultados numéricos fornecidos pelo programa ANSYS 9.0 (2004) para os comprimentos da viga em que a flambagem ocorre no regime elástico delimitado pelo procedimento AISC-SEN.

No procedimento da Zeman (1999), o coeficiente  $k_c$ , dado pela Figura 2.9, não prevê originalmente cargas estabilizantes. Assim neste estudo utilizou-se seu conceito, ou seja, o inverso da raiz do coeficiente  $C_b$ , dado pela Equação (2.4).



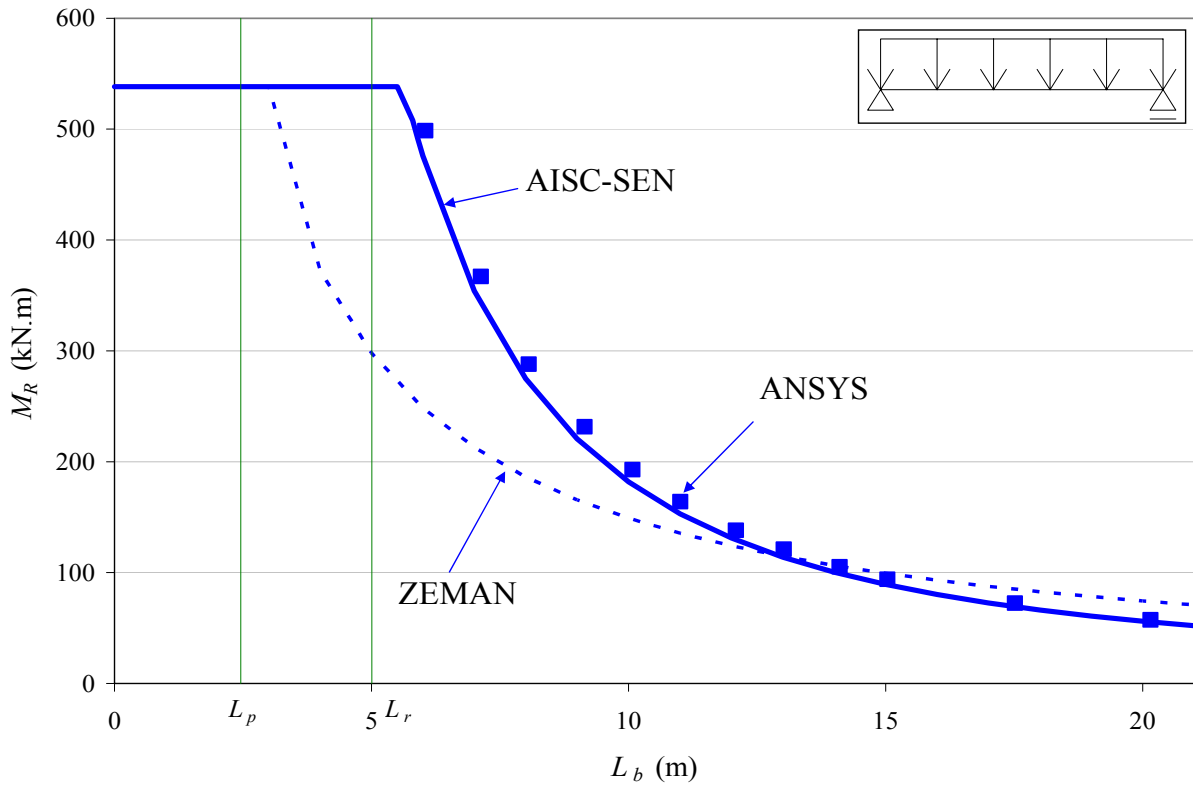


Figura 4.14 – Valores de  $M_R$  para o caso 4 e seção I duplamente simétrica com cargas estabilizantes

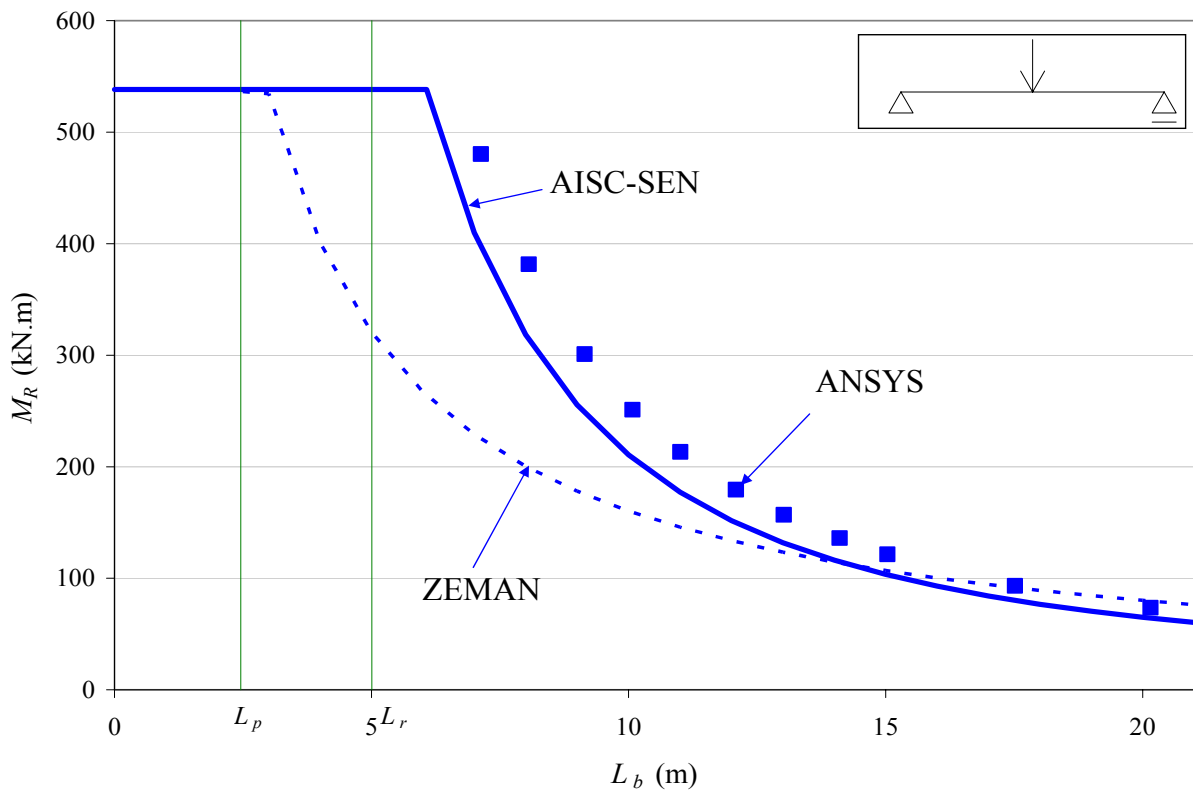


Figura 4.15 – Valores de  $M_R$  para o caso 5 e seção I duplamente simétrica com cargas estabilizantes

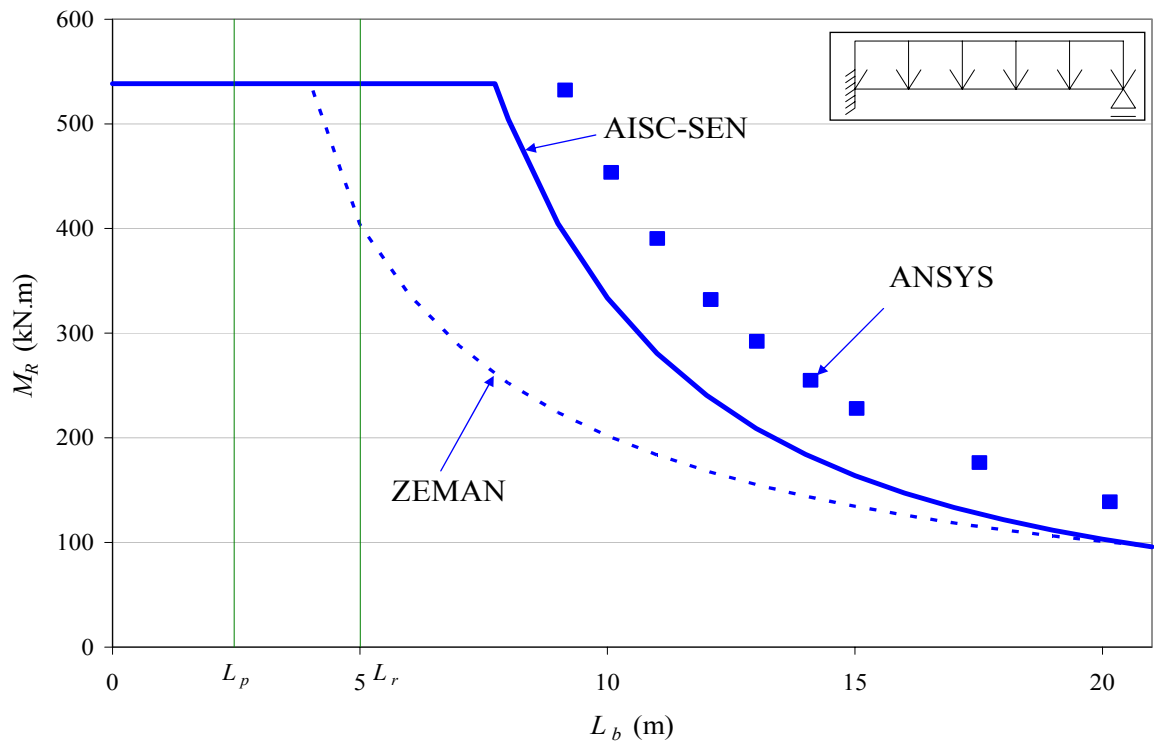


Figura 4.16 – Valores de  $M_R$  para o caso 6 e seção I duplamente simétrica com cargas estabilizantes

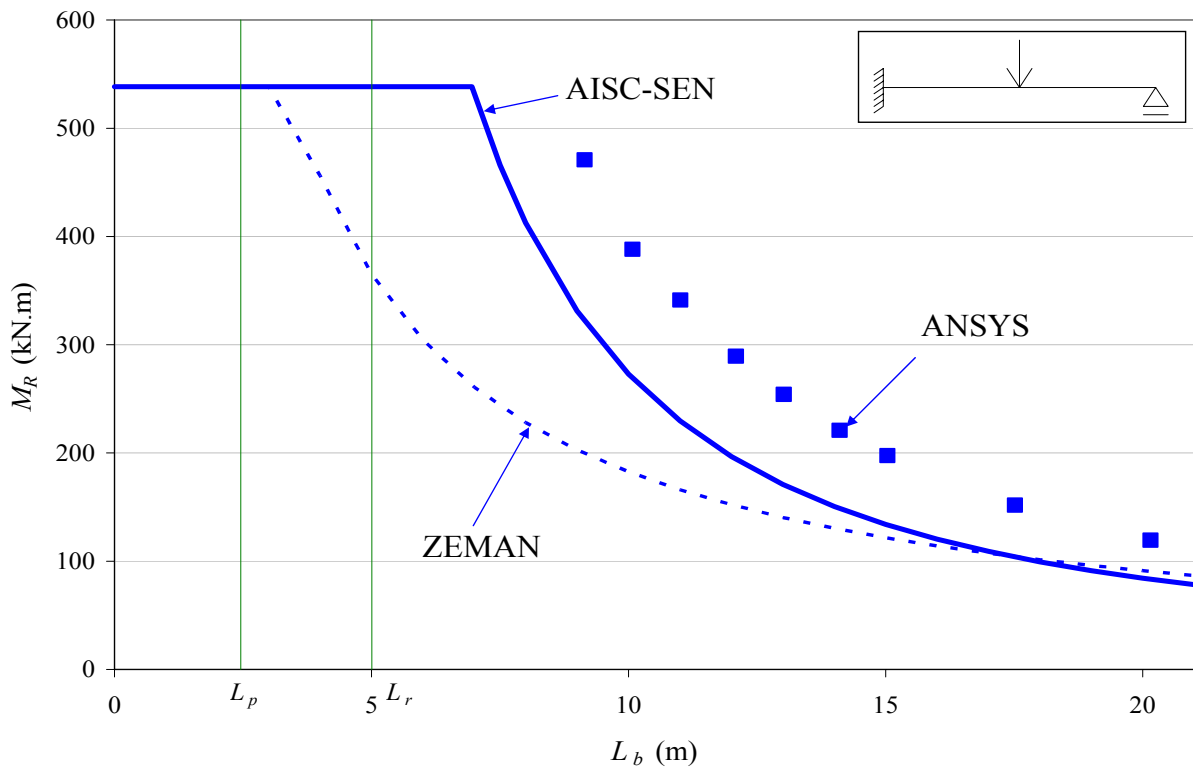


Figura 4.17 – Valores de  $M_R$  para o caso 7 e seção I duplamente simétrica com cargas estabilizantes

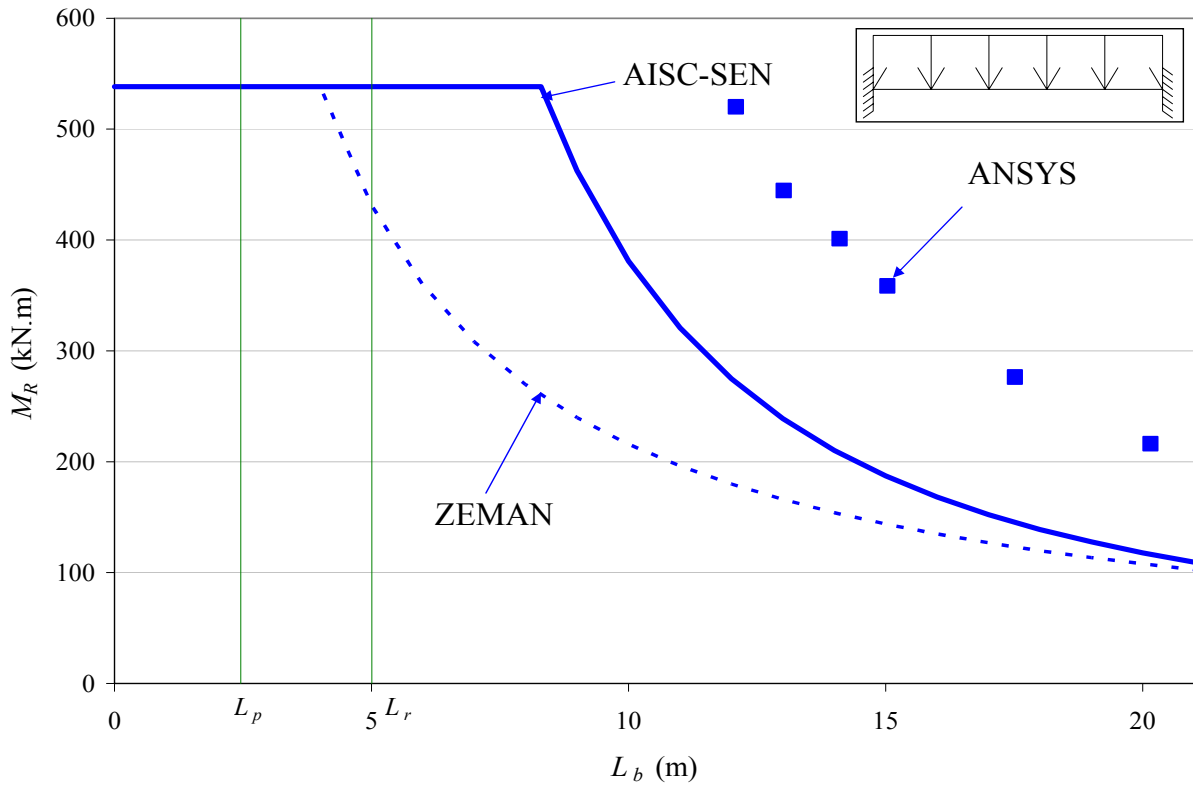


Figura 4.18 – Valores de  $M_R$  para o caso 8 e seção I duplamente simétrica com cargas estabilizantes

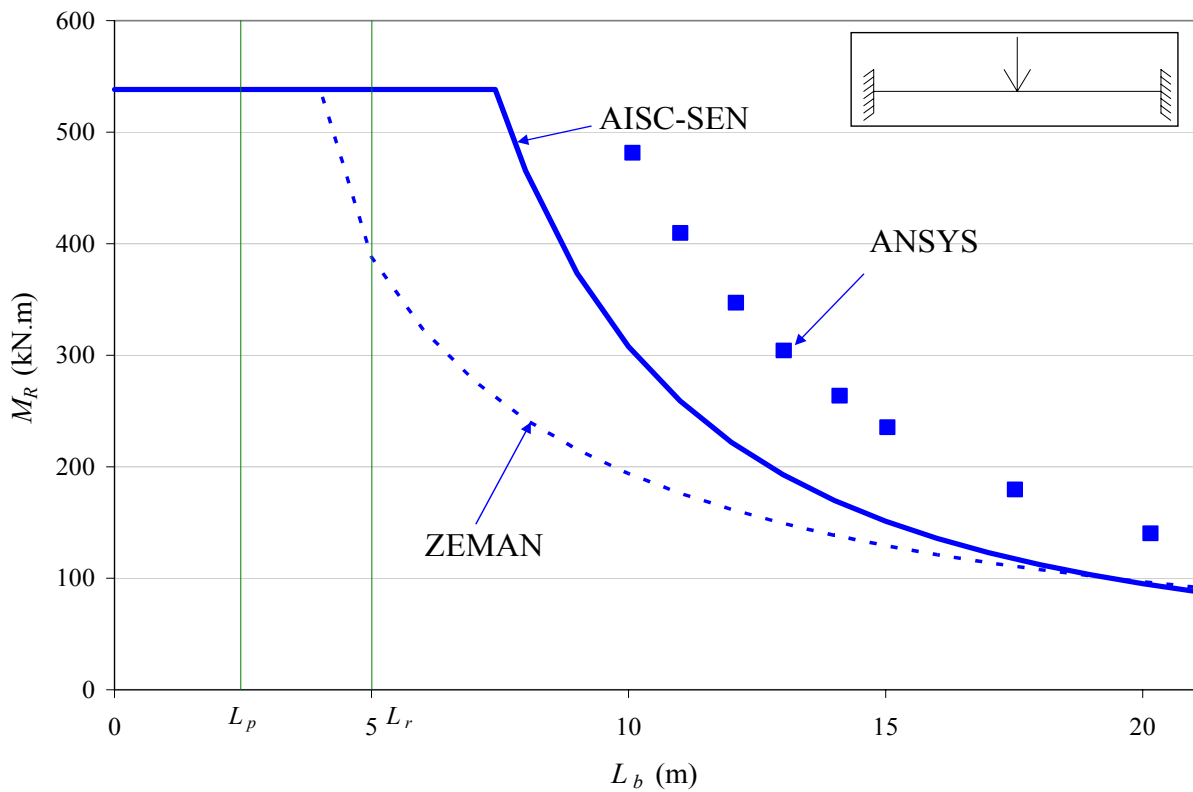


Figura 4.19 – Valores de  $M_R$  para o caso 9 e seção I duplamente simétrica com cargas estabilizantes

Nota-se que o procedimento simplificado da Zeman (1999), assim como quando as cargas foram aplicadas na meia-altura da seção transversal, apresenta momentos resistentes superiores aos do ANSYS 9.0 (2004), e também aos do AISC-SEN, para os maiores comprimentos destravados nos casos 4 e 5, levando a resultados contrários à segurança. Já para os menores comprimentos nos casos 4 e 5, e casos 6 a 9, o procedimento da Zeman (1999) apresenta resultados muito favoráveis à segurança, com momentos resistentes bastantes inferiores. Vale ressaltar, porém, que o procedimento da Zeman (1999) não prevê cargas estabilizantes e para realização deste estudo, o coeficiente  $k_c$  é dado pelo inverso da raiz do coeficiente  $C_b$ , sendo assim, leva em consideração o coeficiente  $C_b$ . Conforme será visto a seguir, o valor  $C_b$ , dado pela Equação (2.4), mostra-se impreciso. Além disso, o procedimento da Zeman (1999) recomenda o uso da curva de resistência da DIN 18800 (1990), que fornece algumas distorções nos resultados, conforme já foi explicitado no sub-item 4.2.1.

No caso 4, o procedimento AISC-SEN apresenta resultados praticamente coincidente aos obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004). Nos casos 5 a 9 o procedimento mostra-se conservador em maior ou menor proporção, tendo como razão o fato de o valor de  $C_b$ , dado pela Equação (2.4), ser aproximado em função da pequena precisão do coeficiente  $R_a$ , dado pela Equação (2.6). Valores de  $C_b$  mais corretos, levando em conta inclusive o nível de aplicação das cargas transversais, pode ser obtido fazendo uma análise mais precisa da instabilidade por flambagem lateral. Reis (1996), por exemplo, desenvolveu um programa computacional, chamado de MCE, em linguagem Turbo-Pascal, com um processo de análise que utilizou o método dos elementos finitos em sua formulação energética, permitindo obter valores de  $M_{cr}$  e de  $C_b$  bastante precisos, considerando quaisquer condições de contorno no plano de flexão e relacionadas à flambagem lateral com torção, a possibilidade de atuação de cargas transversais em nível coincidente ou diferente da meia-altura da seção transversal (cargas estabilizantes ou desestabilizantes), vigas com contenções laterais internas que se comportam como peças contínuas no plano de flambagem, vigas com variação na seção transversal em função de lamelas, aberturas na alma ou recortes nas mesas para ligação. Os resultados obtidos pelo programa computacional mostraram-se plenamente confiáveis, com as concordâncias constatadas nas inúmeras comparações feitas no seu trabalho.

A Tabela 4.1 apresenta os valores de  $C_b$  calculados pela Equação (2.4) para o procedimento AISC-SEN e os valores encontrados usando o programa MCE para os comprimentos da viga

em que a flambagem ocorre no regime elástico delimitado pelo procedimento AISC-SEN, podendo-se notar as diferenças (os valores de  $C_b$  mais precisos, obtidos pelo programa MCE, variam em função do  $L_b$  e são sempre maiores que os obtidos pela Equação 2.4).

Tabela 4.1 – Valores de  $C_b$  para viga duplamente simétrica com cargas estabilizantes

Valores de $C_b$											
Caso 4		Caso 5		Caso 6		Caso 7		Caso 8		Caso 9	
Equação (2.4)		Equação (2.4)		Equação (2.4)		Equação (2.4)		Equação (2.4)		Equação (2.4)	
1,59		1,84		2,92		2,39		3,33		2,69	
Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE	
$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$
6,045	1,74	6,045	-	6,045	-	6,045	-	6,045	-	6,045	-
7,130	1,73	7,130	2,27	7,130	-	7,130	-	7,130	-	7,130	-
8,060	1,72	8,060	2,25	8,060	-	8,060	-	8,060	-	8,060	-
9,145	1,70	9,145	2,24	9,145	-	9,145	-	9,145	-	9,145	-
10,075	1,69	10,075	2,22	10,075	4,68	10,075	4,03	10,075	-	10,075	-
11,005	1,68	11,005	2,20	11,005	4,63	11,005	3,99	11,005	-	11,005	4,88
12,090	1,67	12,090	2,18	12,090	4,57	12,090	3,94	12,090	-	12,090	4,80
13,020	1,66	13,020	2,17	13,020	4,52	13,020	3,89	13,020	-	13,020	4,73
14,105	1,64	14,105	2,14	14,105	4,46	14,105	3,83	14,105	7,62	14,105	4,65
15,035	1,63	15,035	2,13	15,035	4,40	15,035	3,78	15,035	7,50	15,035	4,58
17,515	1,60	17,515	2,08	17,515	4,26	17,515	3,66	17,515	7,18	17,515	4,40
20,150	1,57	20,150	2,03	20,150	4,12	20,150	3,53	20,150	6,86	20,150	4,22

Comparações entre os resultados obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004) e os obtidos pelo procedimento AISC-SEN, apenas no trecho em que a flambagem ocorre em regime elástico, usando o  $C_b$  fornecido pelo programa MCE são expostas nas Figuras 4.20 a 4.25, respectivamente para os casos 4 a 9.

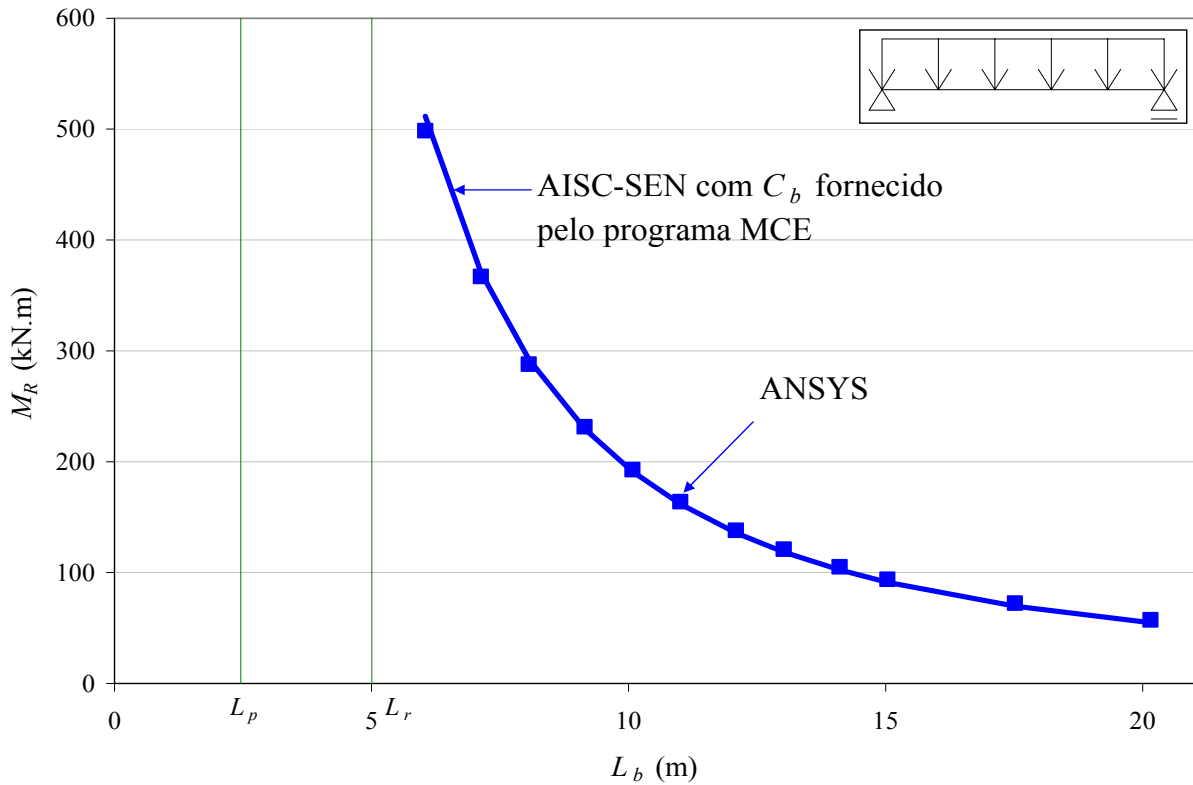


Figura 4.20 – Comparação do caso 4 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes

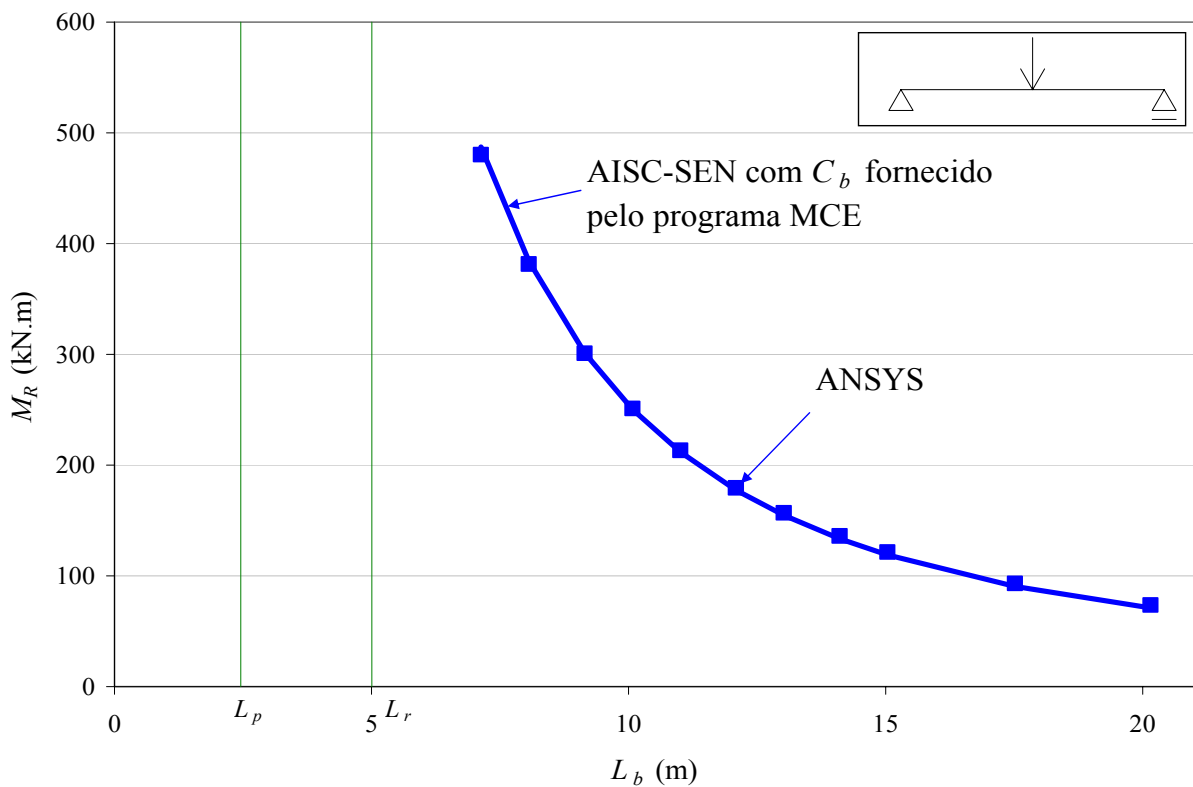


Figura 4.21 – Comparação do caso 5 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes

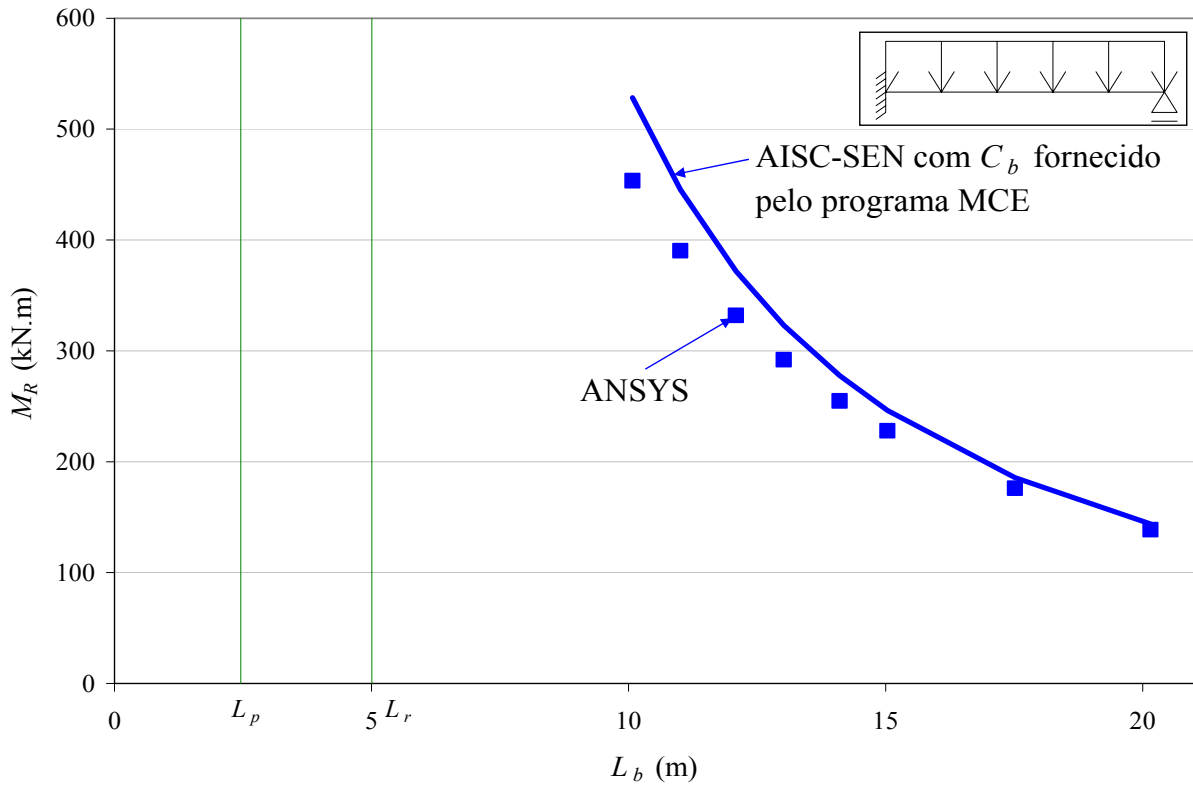


Figura 4.22 – Comparação do caso 6 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes

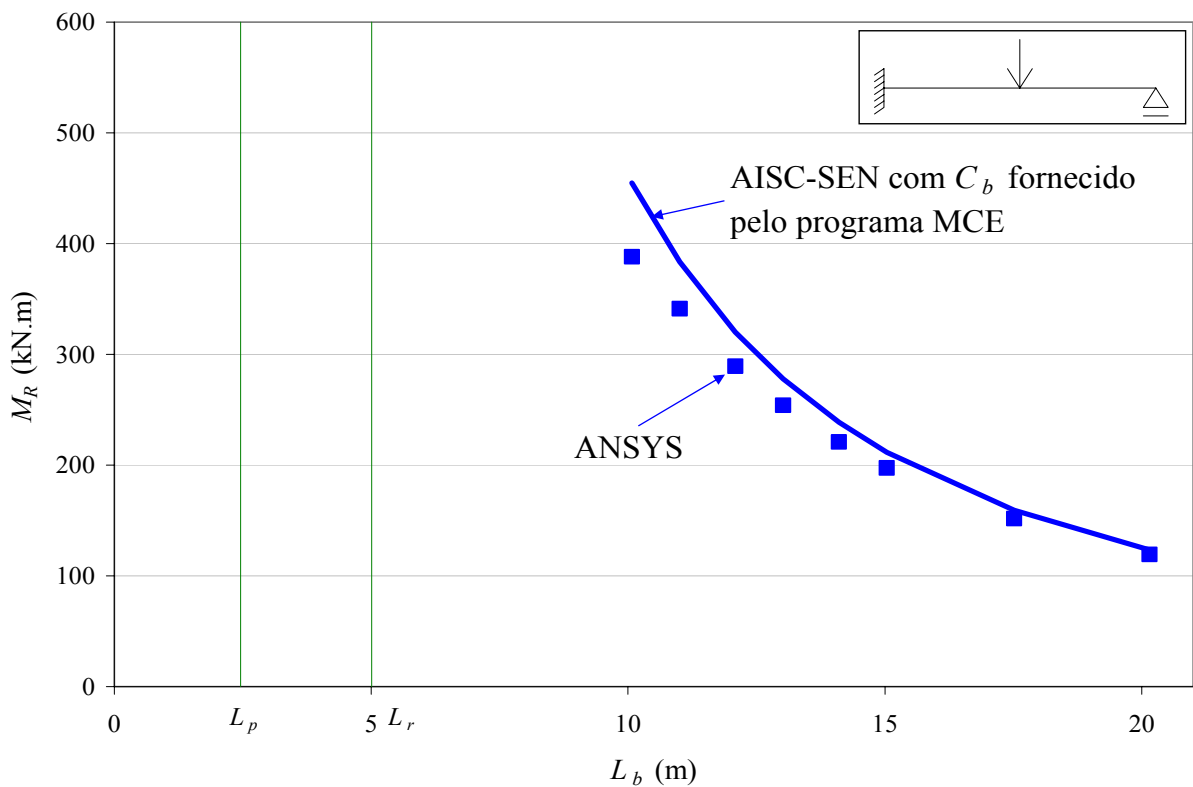


Figura 4.23 – Comparação do caso 7 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes

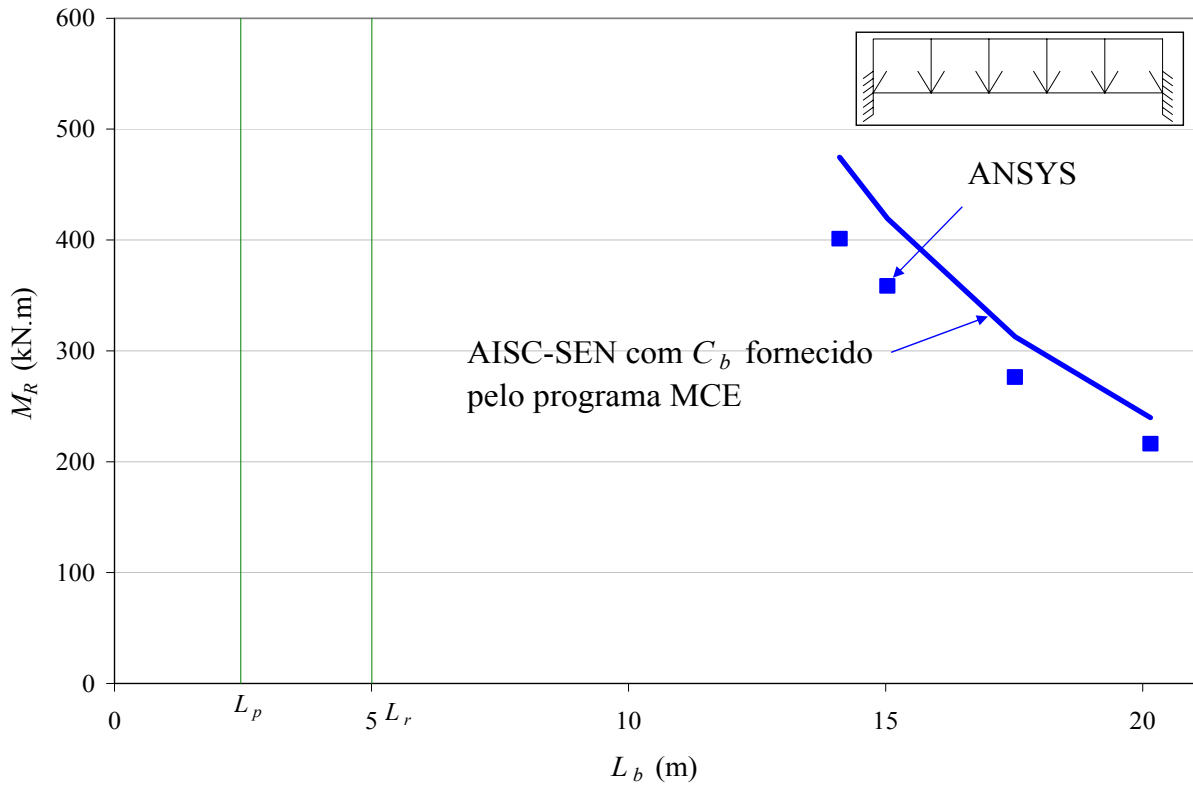


Figura 4.24 – Comparação do caso 8 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes

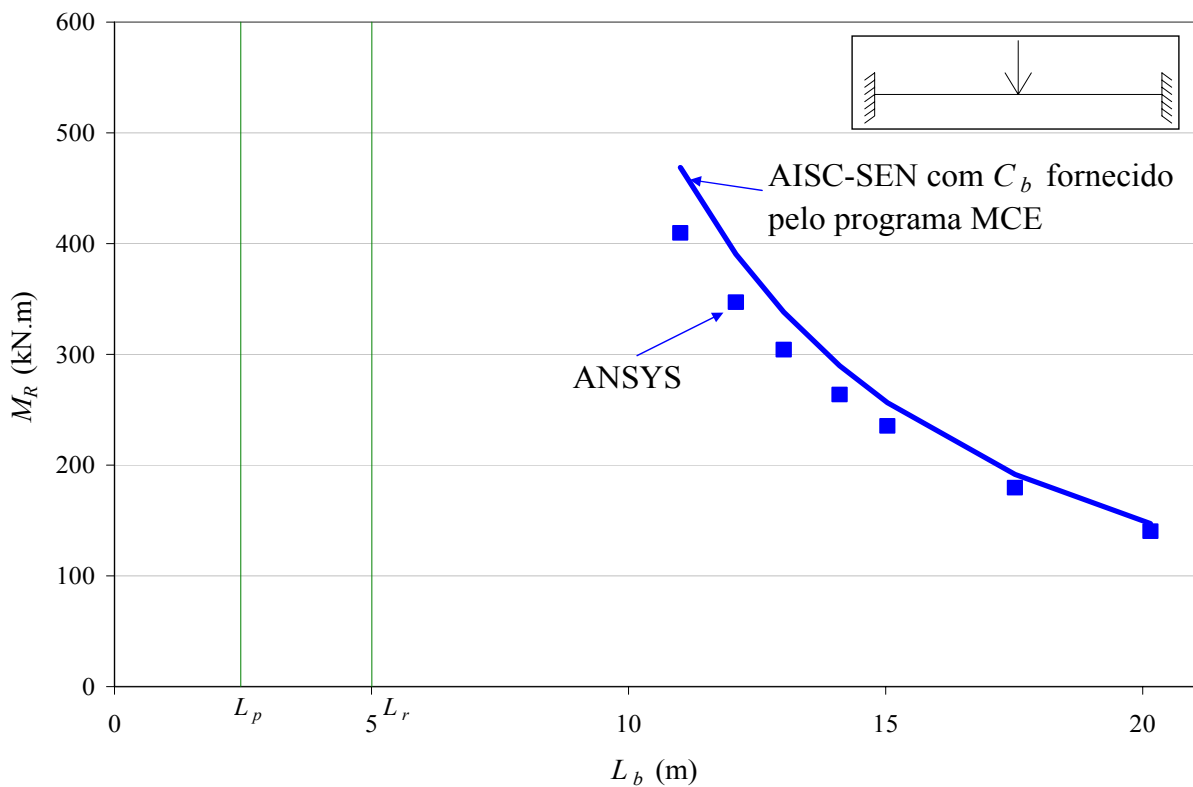


Figura 4.25 – Comparação do caso 9 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes



Os valores obtidos pelo procedimento AISC-SEN com  $C_b$  fornecido pelo programa MCE, nos casos 4 e 5, ficaram muito próximos dos valores obtidos com o ANSYS 9.0 (2004). Nos demais casos (6, 7, 8, e 9), os resultados do procedimento AISC-SEN mostraram-se maiores que os dos obtidos pelo programa ANSYS 9.0 (2004). Tal fato ocorre porque os momentos resistentes para cargas estabilizantes são relativamente elevados, o que faz com que ocorra grande distorção da alma. Essa distorção, que só é percebida ao usar o ANSYS 9.0 (2004), reduz os valores de momento resistente. Notou-se ainda que a redução é mais acentuada para vãos menores, assim como na carga aplicada na meia-altura da seção transversal.

Neste trabalho, procurando obter uma idéia qualitativa da distorção da alma, para o caso 8, obteve-se do programa ANSYS 9.0 (2004) os deslocamentos normalizados na seção central da viga, para vãos de 40,145 m e 14,105 m, na ocorrência da flambagem lateral com torção, conforme ilustra a Figura 4.26, feita mantendo uma escala fixa. Verifica-se então que, embora o ângulo de torção das mesas comprimida e tracionada tenham sido praticamente iguais, a diferença entre os deslocamentos laterais destas duas mesas foi significativamente maior na viga de menor vão (14,105m), indicando claramente a maior distorção da alma.

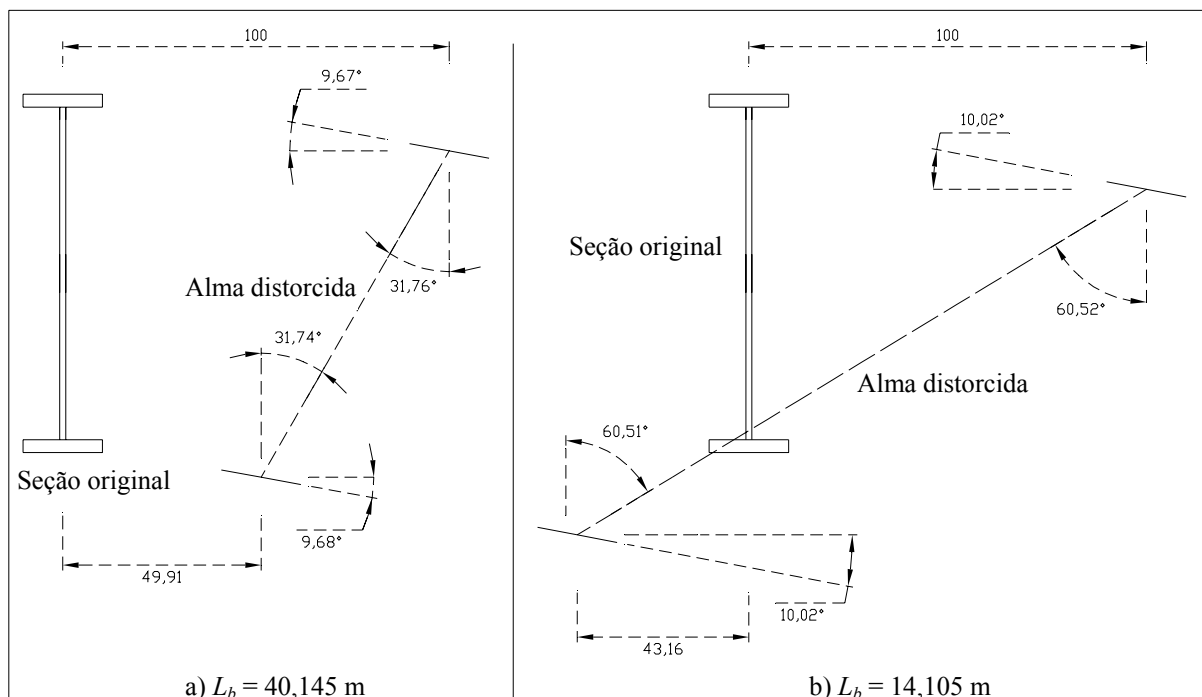


Figura 4.26 – Idéia qualitativa da distorção da alma na flambagem

### 4.2.3. Cargas Transversais Aplicadas na Face Superior (Desestabilizantes)

No procedimento da Zeman (1999), assim como para as cargas estabilizantes, usou-se o valor do coeficiente  $k_c$  igual ao inverso da raiz quadrada do coeficiente  $C_b$ , dado pela Equação (2.4).

Encontram-se nas Figuras 4.27 a 4.32, respectivamente para os casos 4 a 9, os valores de  $M_R$  calculados pelos procedimentos AISC-SEN e da Zeman (1999) e também os resultados fornecidos pelo programa ANSYS 9.0 (2004) para os comprimentos da viga em que a flambagem ocorre no regime elástico delimitado pelo procedimento AISC-SEN.

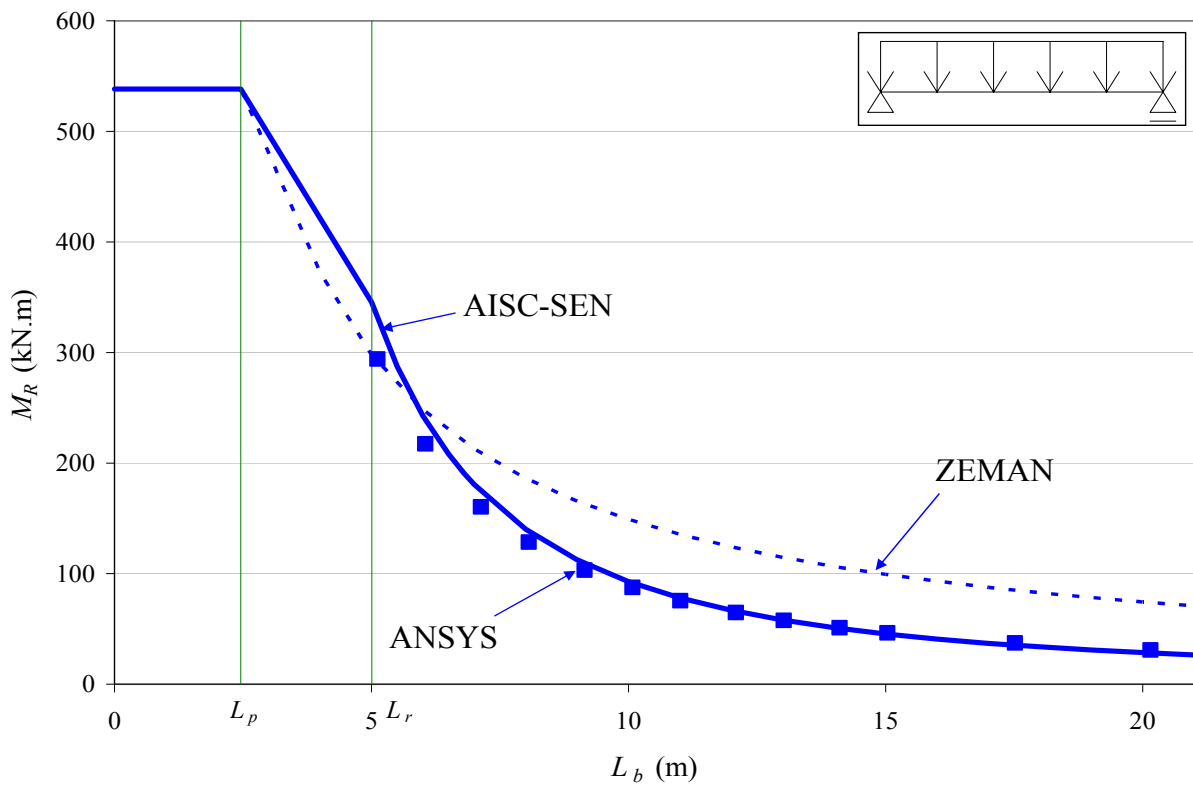


Figura 4.27 – Valores de  $M_R$  para o caso 4 e seção I duplamente simétrica com cargas desestabilizantes

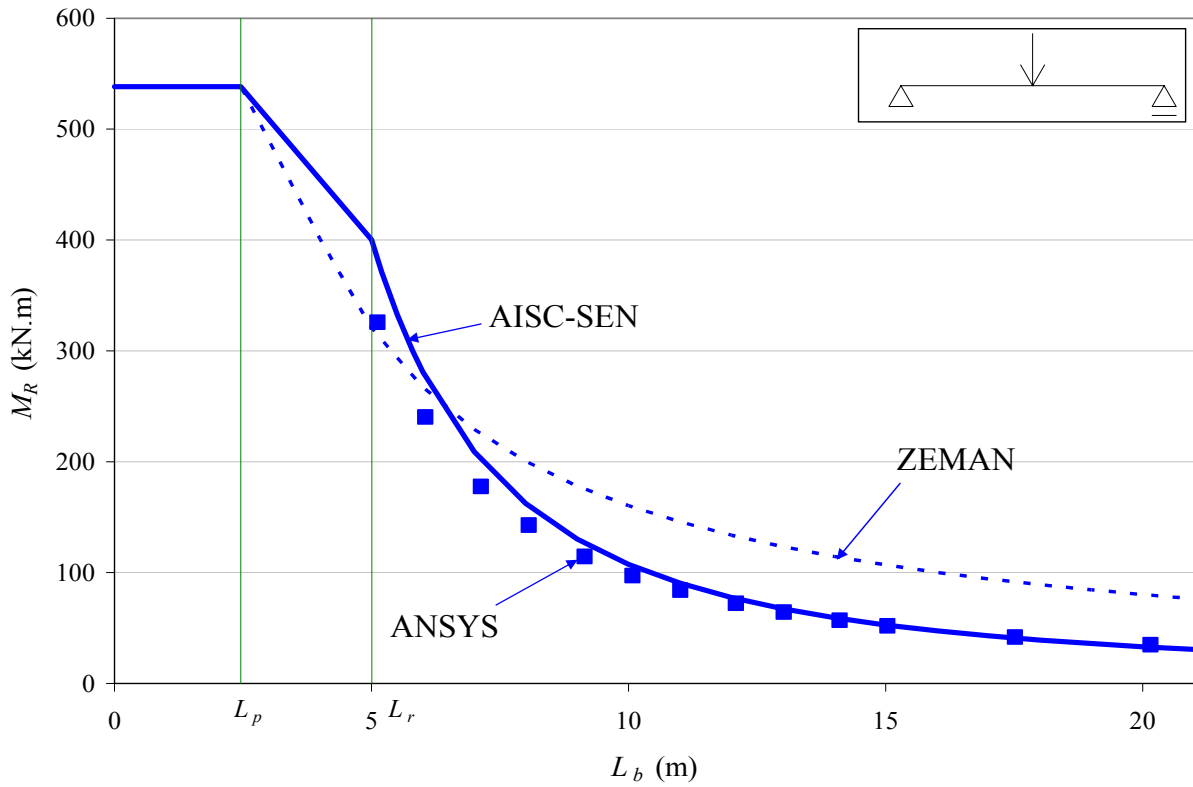


Figura 4.28 – Valores de  $M_R$  para o caso 5 e seção I duplamente simétrica com cargas desestabilizantes

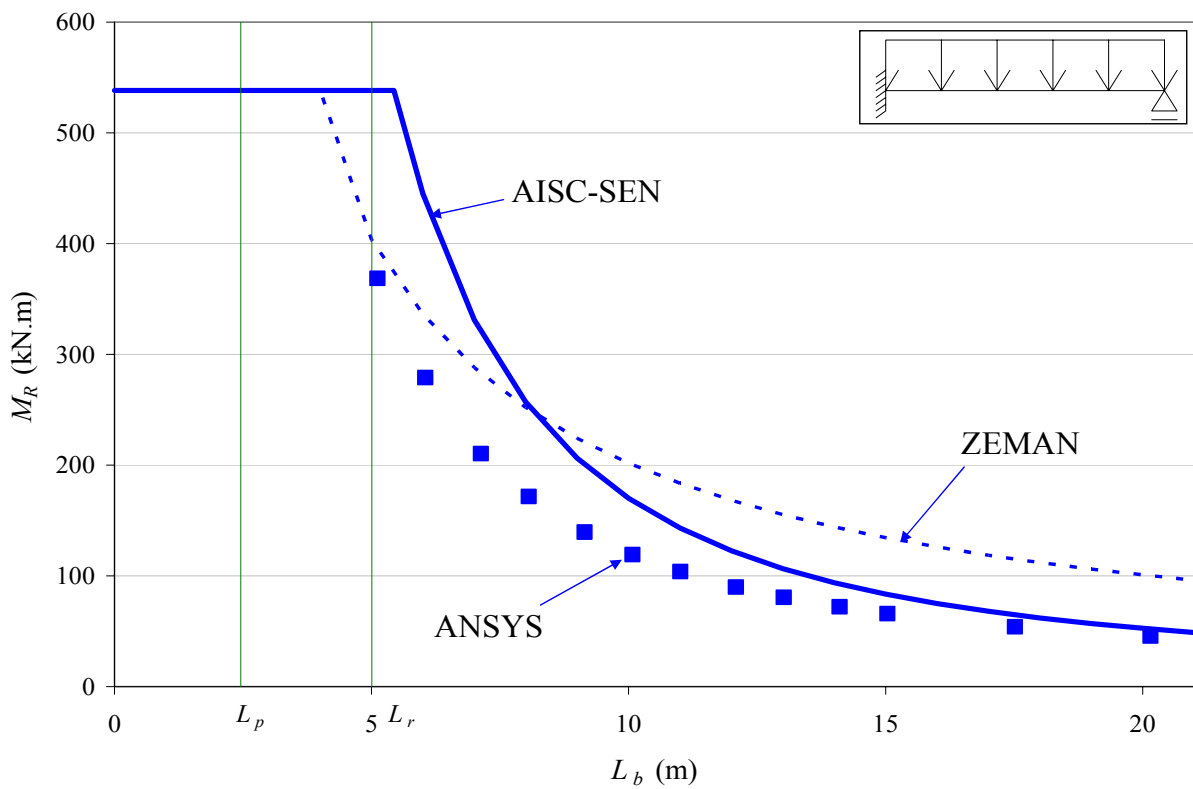


Figura 4.29 – Valores de  $M_R$  para o caso 6 e seção I duplamente simétrica com cargas desestabilizantes

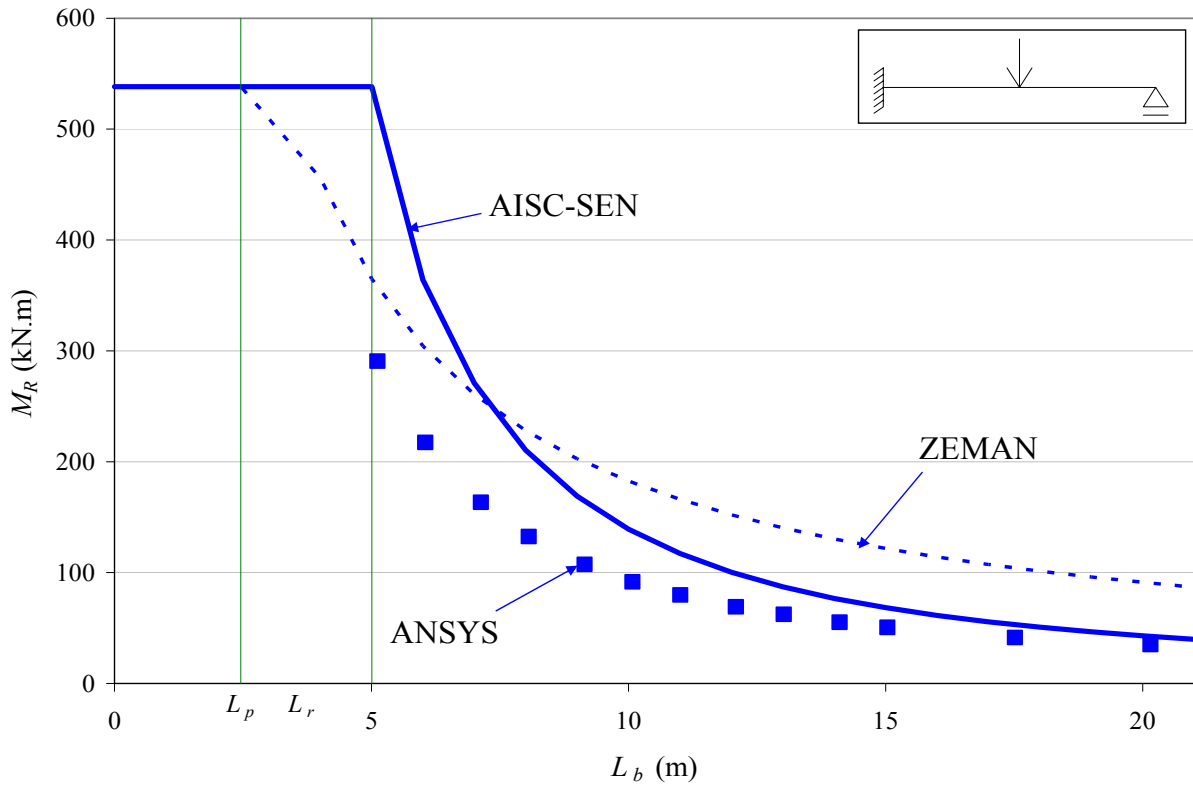


Figura 4.30 – Valores de  $M_R$  para o caso 7 e seção I duplamente simétrica com cargas desestabilizantes

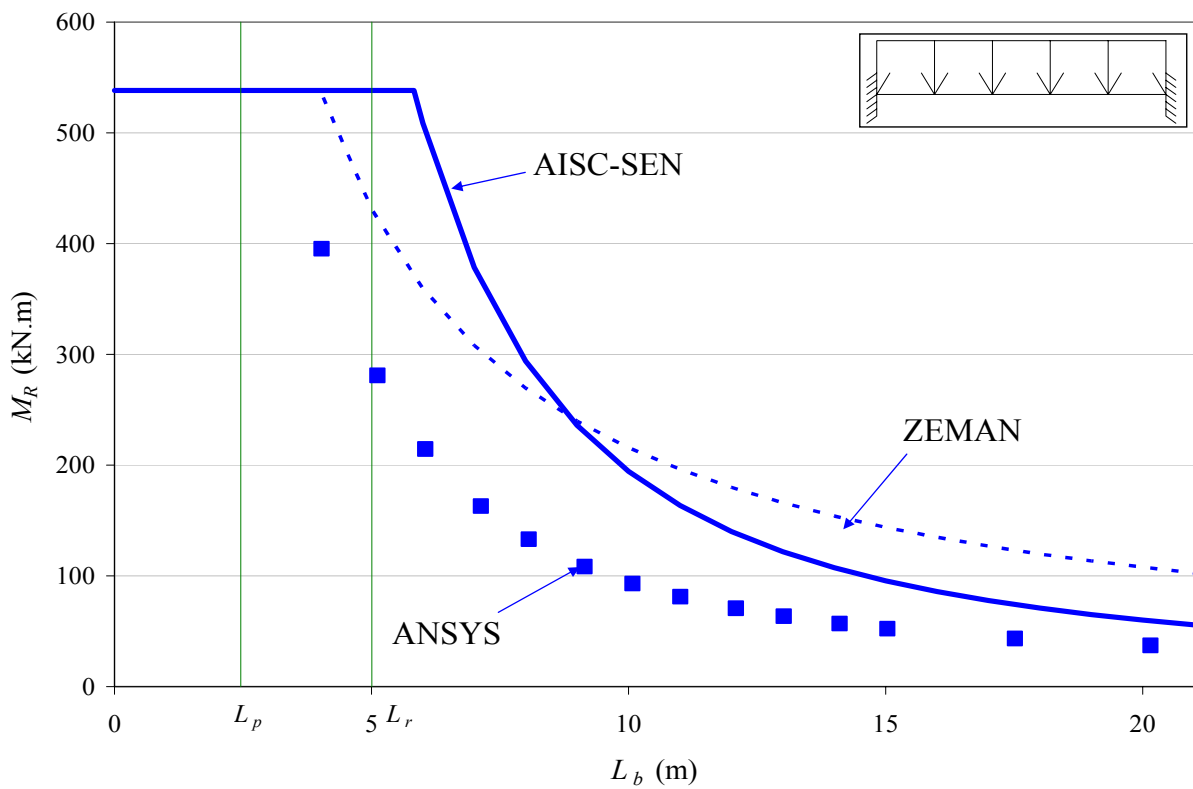


Figura 4.31 – Valores de  $M_R$  para o caso 8 e seção I duplamente simétrica com cargas desestabilizantes

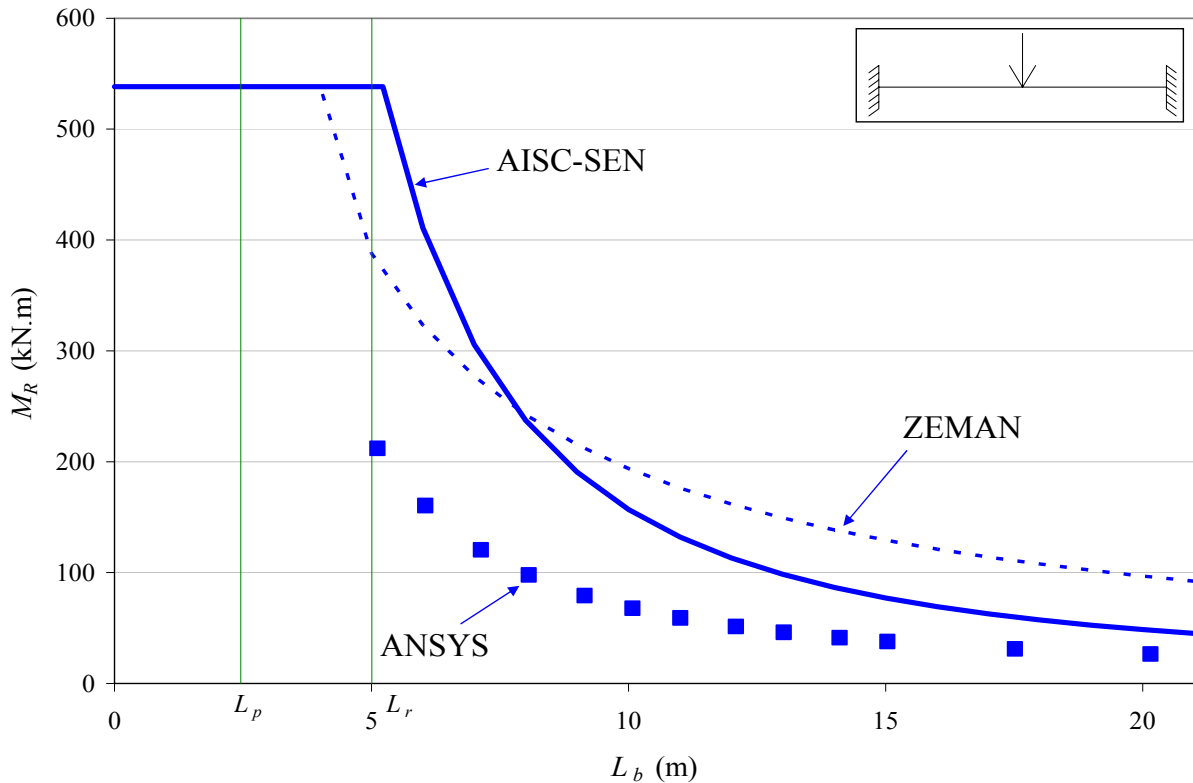


Figura 4.32 – Valores de  $M_R$  para o caso 9 e seção I duplamente simétrica com cargas desestabilizantes

Observa-se que o procedimento simplificado da Zeman (1999), de modo similar às condições em que as cargas foram aplicadas na meia-altura e na face inferior da seção transversal, apresenta momentos resistentes superiores aos do ANSYS 9.0 (2004), e também aos do AISC-SEN, para os maiores comprimentos destravados em todos os casos de carregamento considerados, levando a resultados contrários à segurança. Já para os menores comprimentos, o procedimento da Zeman (1999) apresenta momentos resistentes inferiores, com resultados favoráveis à segurança. Isso se deve ao fato de a curva de resistência da DIN 18800 (1990) ser pouco precisa, como já foi explicado no sub-item 4.2.1. Além disso, deve-se notar que o procedimento da Zeman (1999) não prevê cargas desestabilizantes e para realização deste estudo, o coeficiente  $k_c$  é dado pelo inverso da raiz do coeficiente  $C_b$ , sendo assim, leva em consideração o coeficiente  $C_b$ . Conforme será visto a seguir, o valor  $C_b$ , dado pela Equação (2.4), mostra-se impreciso.

Nos casos 4 e 5, o procedimento AISC-SEN apresenta resultados muito próximos dos resultados obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004) apenas para os maiores comprimentos destravados. Nos menores comprimentos, apresenta resultados ligeiramente maiores por causa

do problema da distorção da alma, já discutido anteriormente. Nos casos 6, 7, 8 e 9, o procedimento AISC-SEN apresenta resultados contrários à segurança praticamente em toda a faixa estudada. Isto deve-se ao fato de o coeficiente  $C_b$ , dado pela Equação (2.4) ser aproximado, da mesma maneira que nas cargas estabilizantes. Em um estudo adicional, foi usado o programa computacional MCE, desenvolvido na UFMG por Reis (1996), para obtenção de valores mais corretos de  $C_b$ . A Tabela 4.2 apresenta os valores de  $C_b$  obtidos usando a Equação (2.4) e o programa MCE para os comprimentos da viga em que a flambagem ocorre no regime elástico delimitado pelo procedimento AISC-SEN.

Tabela 4.2 – Valores de  $C_b$  para viga duplamente simétrica com cargas desestabilizantes

Valores de $C_b$											
Caso 4		Caso 5		Caso 6		Caso 7		Caso 8		Caso 9	
Equação (2.4)		Equação (2.4)		Equação (2.4)		Equação (2.4)		Equação (2.4)		Equação (2.4)	
0,81		0,94		1,49		1,22		1,70		1,37	
Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE	
$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$
3,100	-	3,100	-	3,100	-	3,100	-	3,100	-	3,100	0,55
4,030	0,73	4,030	-	4,030	-	4,030	0,76	4,030	0,76	4,030	0,55
5,115	0,73	5,115	0,81	5,115	1,01	5,115	0,76	5,115	0,76	5,115	0,56
6,045	0,73	6,045	0,81	6,045	1,01	6,045	0,77	6,045	0,77	6,045	0,56
7,130	0,74	7,130	0,81	7,130	1,02	7,130	0,78	7,130	0,78	7,130	0,57
8,060	0,74	8,060	0,82	8,060	1,03	8,060	0,78	8,060	0,79	8,060	0,58
9,145	0,75	9,145	0,83	9,145	1,04	9,145	0,79	9,145	0,80	9,145	0,58
10,075	0,75	10,075	0,83	10,075	1,06	10,075	0,80	10,075	0,81	10,075	0,59
11,005	0,76	11,005	0,84	11,005	1,07	11,005	0,81	11,005	0,82	11,005	0,60
12,090	0,76	12,090	0,85	12,090	1,08	12,090	0,82	12,090	0,84	12,090	0,61
13,020	0,77	13,020	0,85	13,020	1,09	13,020	0,83	13,020	0,85	13,020	0,62
14,105	0,77	14,105	0,86	14,105	1,11	14,105	0,84	14,105	0,87	14,105	0,63
15,035	0,78	15,035	0,87	15,035	1,12	15,035	0,85	15,035	0,88	15,035	0,64
17,515	0,80	17,515	0,89	17,515	1,16	17,515	0,88	17,515	0,92	17,515	0,66
20,150	0,81	20,150	0,91	20,150	1,20	20,150	0,92	20,150	0,96	20,150	0,69

As Figuras 4.33 a 4.38 mostram comparações, respectivamente para os casos 4 a 9, entre os resultados obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004) e o procedimento AISC-SEN, usando o  $C_b$  fornecido pelo programa MCE, em regime elástico.

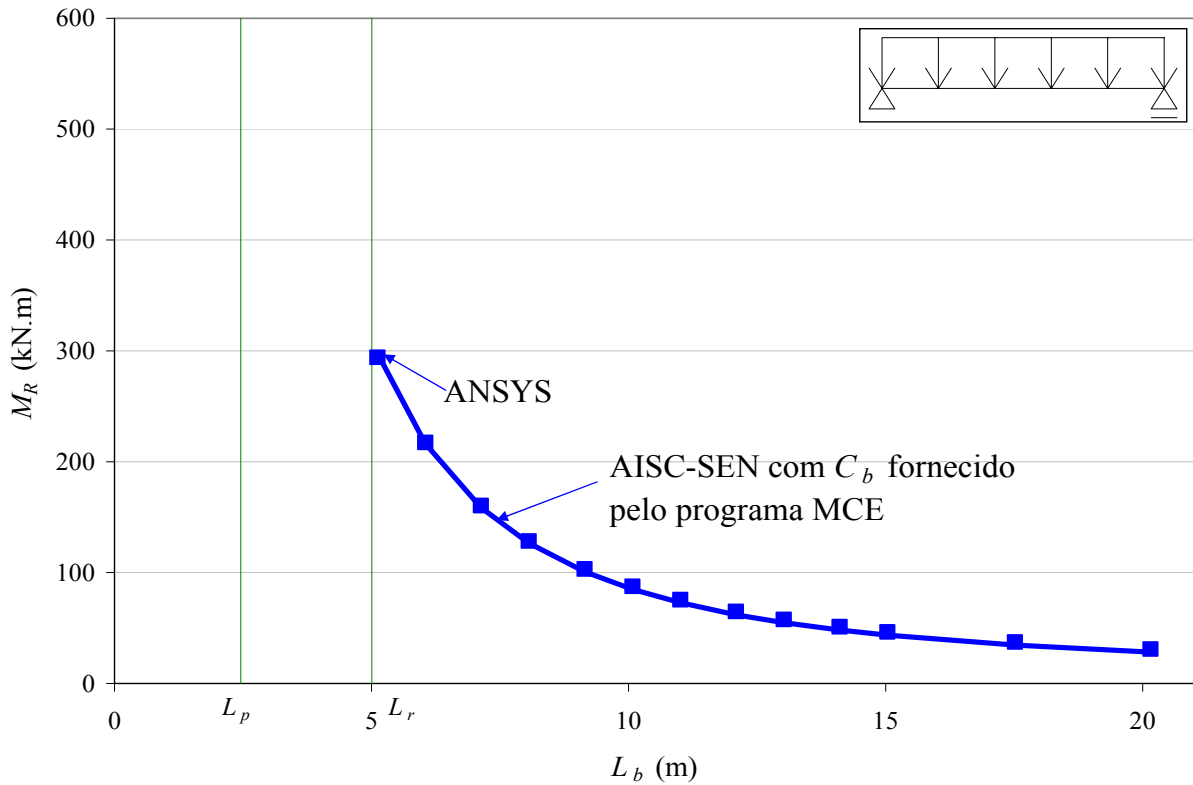


Figura 4.33 – Comparação do caso 4 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes

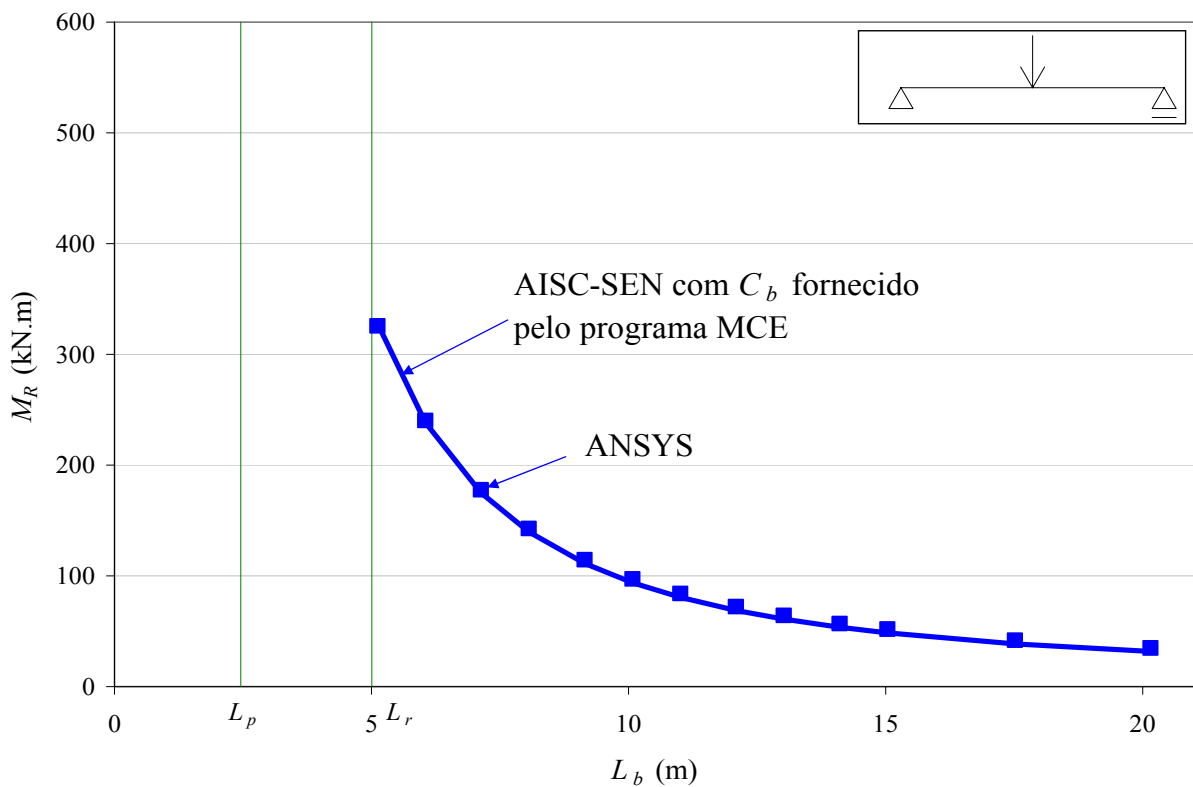


Figura 4.34 – Comparação do caso 5 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes

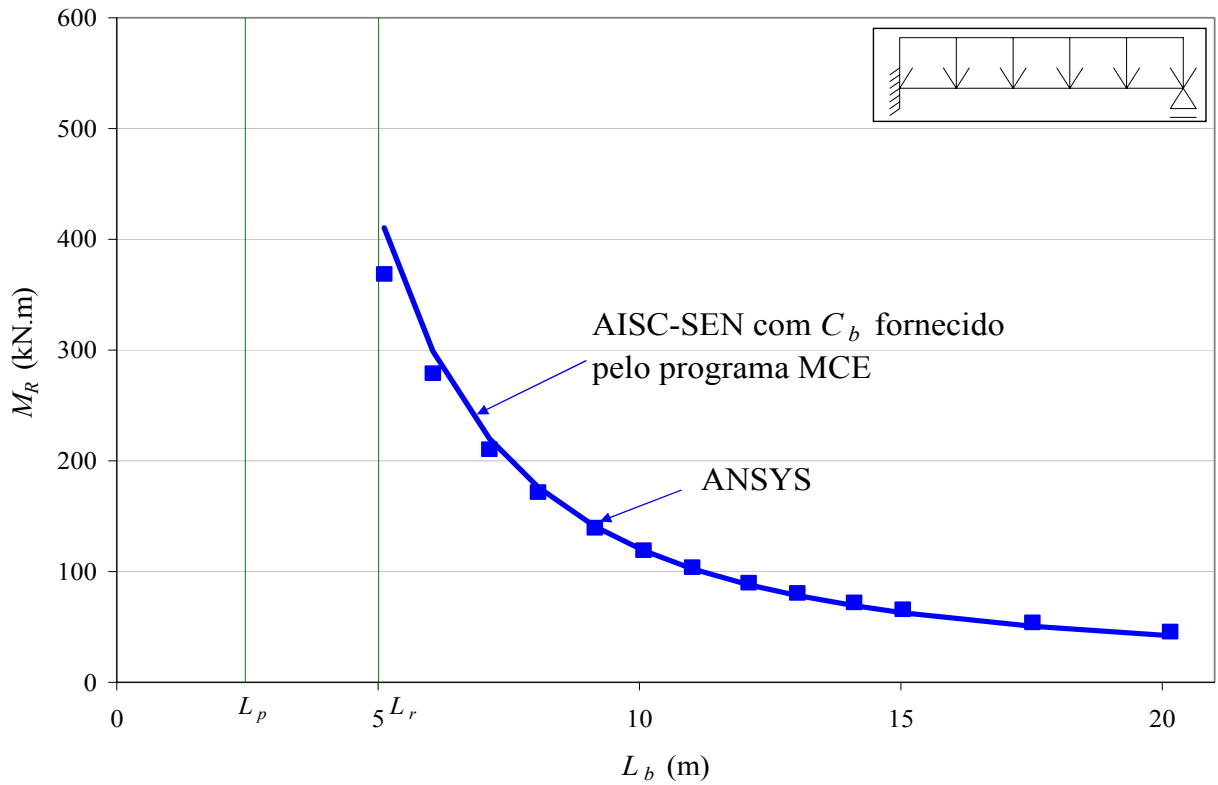


Figura 4.35 – Comparação do caso 6 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes

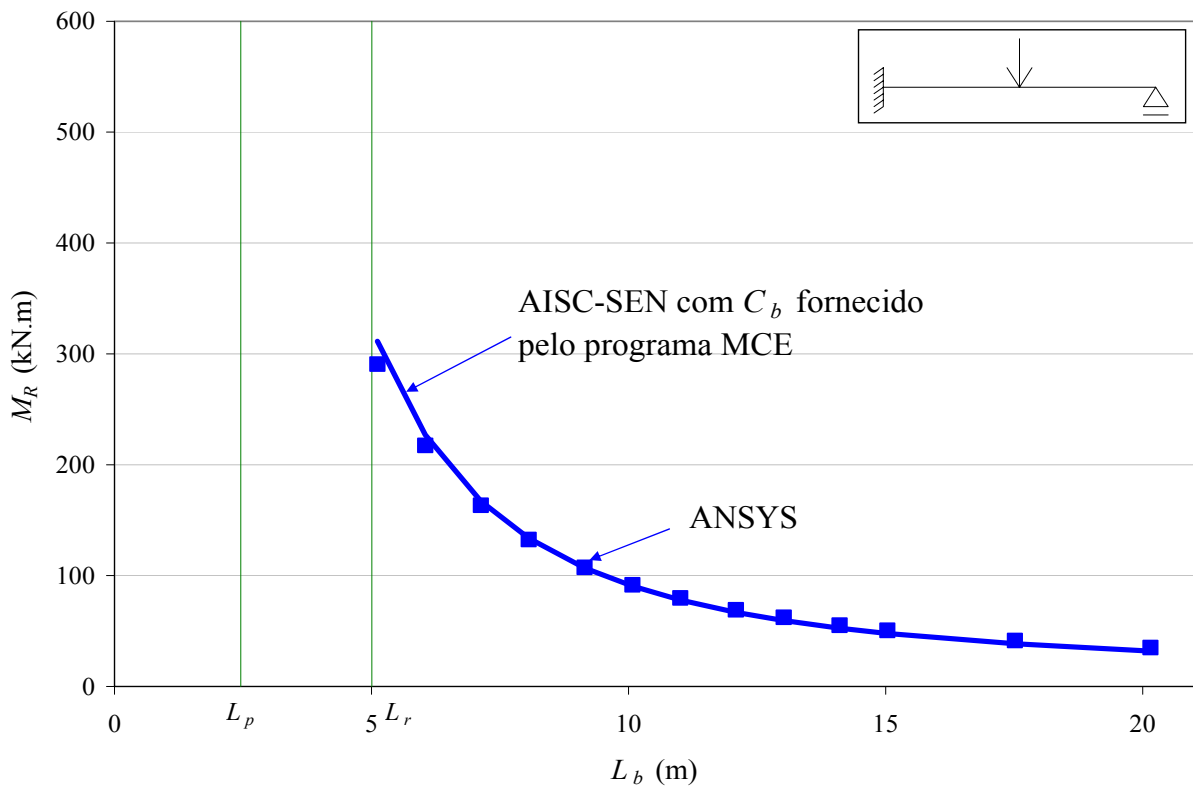


Figura 4.36 – Comparação do caso 7 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes



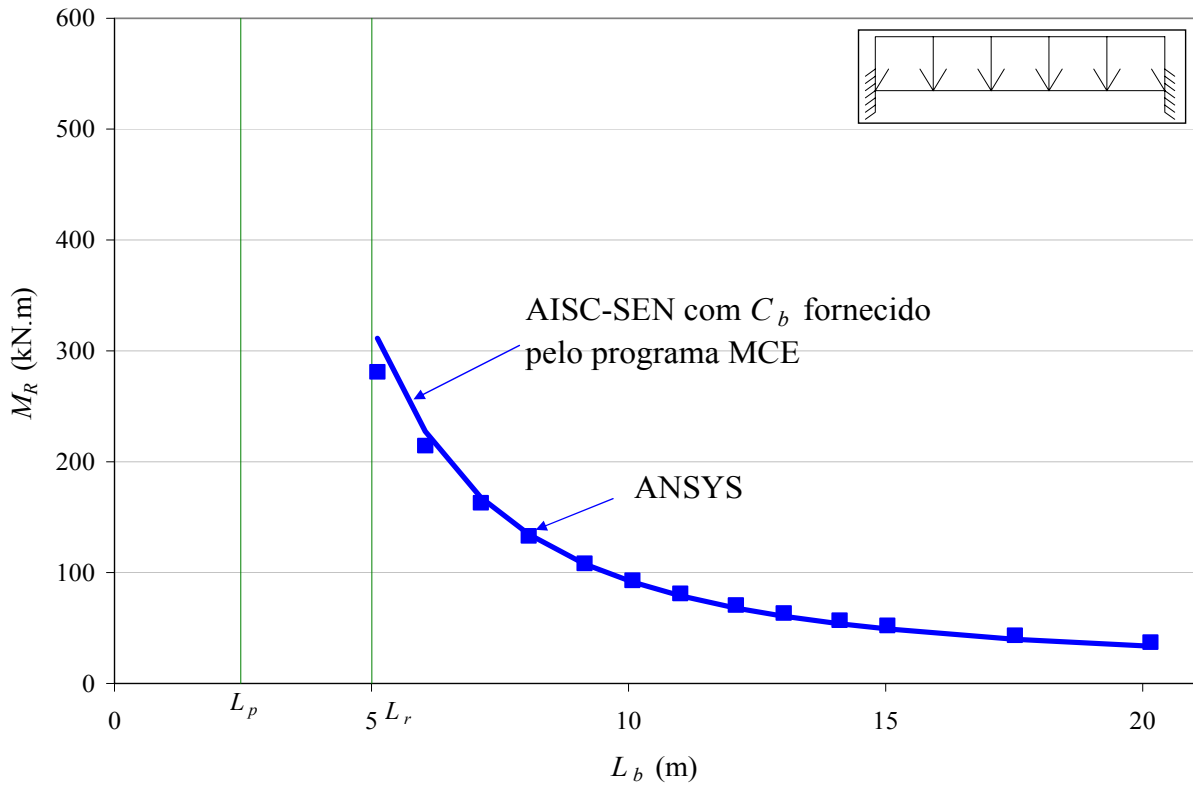


Figura 4.37 – Comparação do caso 8 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes

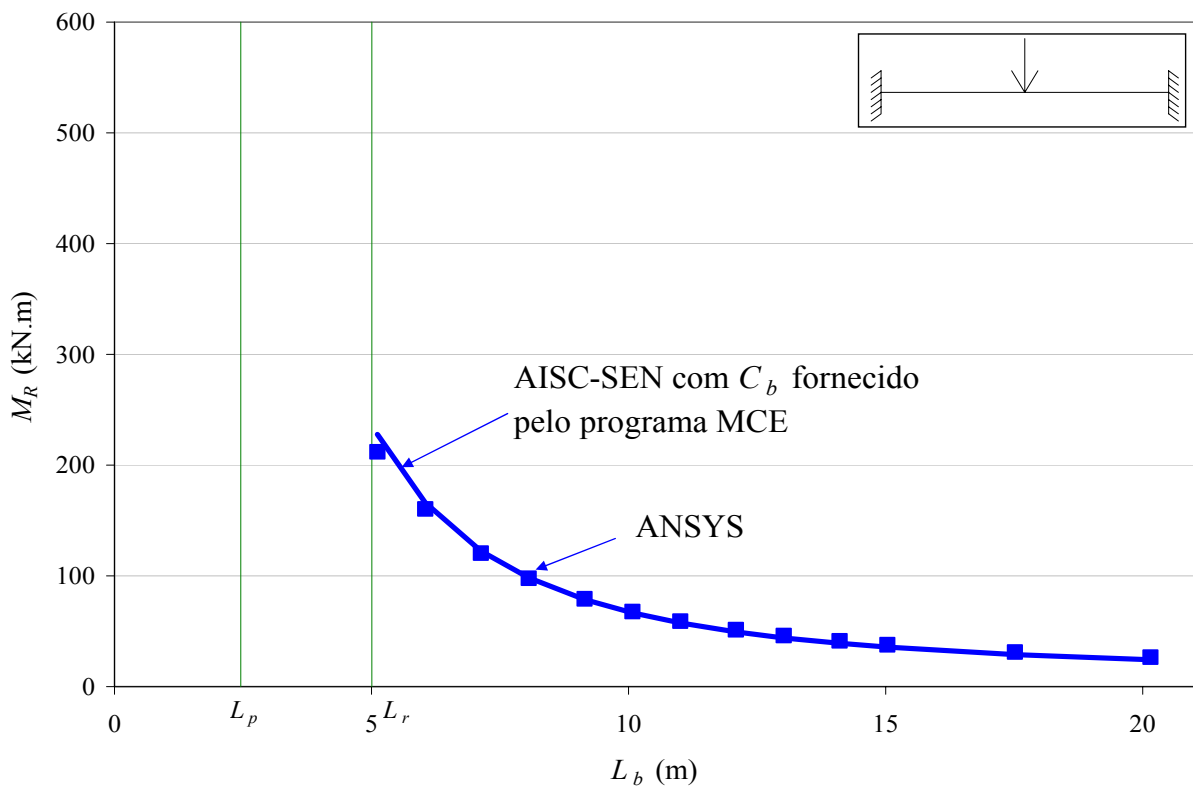


Figura 4.38 – Comparação do caso 9 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes

Com os valores de  $C_b$  fornecidos pelo programa MCE, o procedimento AISC-SEN apresenta resultados próximos aos valores de momentos resistentes obtidos numericamente pelo programa ANSYS 9.0 (2004), mostrando-se um procedimento confiável.

Nota-se também para as cargas desestabilizantes que, se o vão diminui, a relação entre os momentos resistentes obtidos pelo programa ANSYS 9.0 (2004) e pelo AISC-SEN também se reduz, em decorrência deste não considerar o efeito da distorção da alma na flambagem (Ma & Hughes 1996, Hughes & Ma 1996 e Samanta & Kumar 2005) e a alma nas propriedades geométricas da seção transversal.

### **4.3. Viga de Seção Monossimétrica**

Para a viga de seção I monossimétrica analisada, com as dimensões apresentadas na Figura 3.5.b, foram realizados também três estudos. Em um primeiro estudo, cujos resultados estão no sub-item 4.3.1, foram aplicados momentos (casos 1, 2 e 3 – ver Figura 3.2) e cargas transversais (casos 4, 5, 6, 7, 8 e 9 – ver Figura 3.2) dispostas na meia-altura da seção transversal, que não coincide com o centro de torção da viga. Em seguida, foram aplicadas cargas estabilizantes (na face inferior da seção transversal da viga), com os resultados mostrados no sub-item 4.3.2, para os casos 4 a 9. Por último, foram aplicadas cargas desestabilizantes (na face superior da seção transversal da viga), com os resultados mostrados no sub-item 4.3.3, para os casos 4 a 9. Ainda, nos três estudos, nos casos 1, 2 e 4 a 9, a seção transversal foi disposta nas Posições A e B, conforme descrito no sub-item 3.4.

#### **4.3.1. Momentos e Cargas Transversais Aplicadas na Meia-Altura da Seção Transversal**

Os valores de  $M_R$ , calculados pelos procedimentos AISC-SEN e da Zeman (1999), encontram-se nas Figuras 4.39 a 4.47, respectivamente para os casos 1 a 9, indicados na Figura 3.2, e também os resultados fornecidos pelo programa ANSYS 9.0 (2004) para os comprimentos da viga em que a flambagem ocorre no regime elástico delimitado pelo procedimento AISC-SEN. As posições como a seção transversal foi disposta, que podem comprimir a mesa de menor espessura ou a mesa de maior espessura, como explicitado anteriormente, estão indicadas nas figuras respectivamente como Posição A e Posição B.

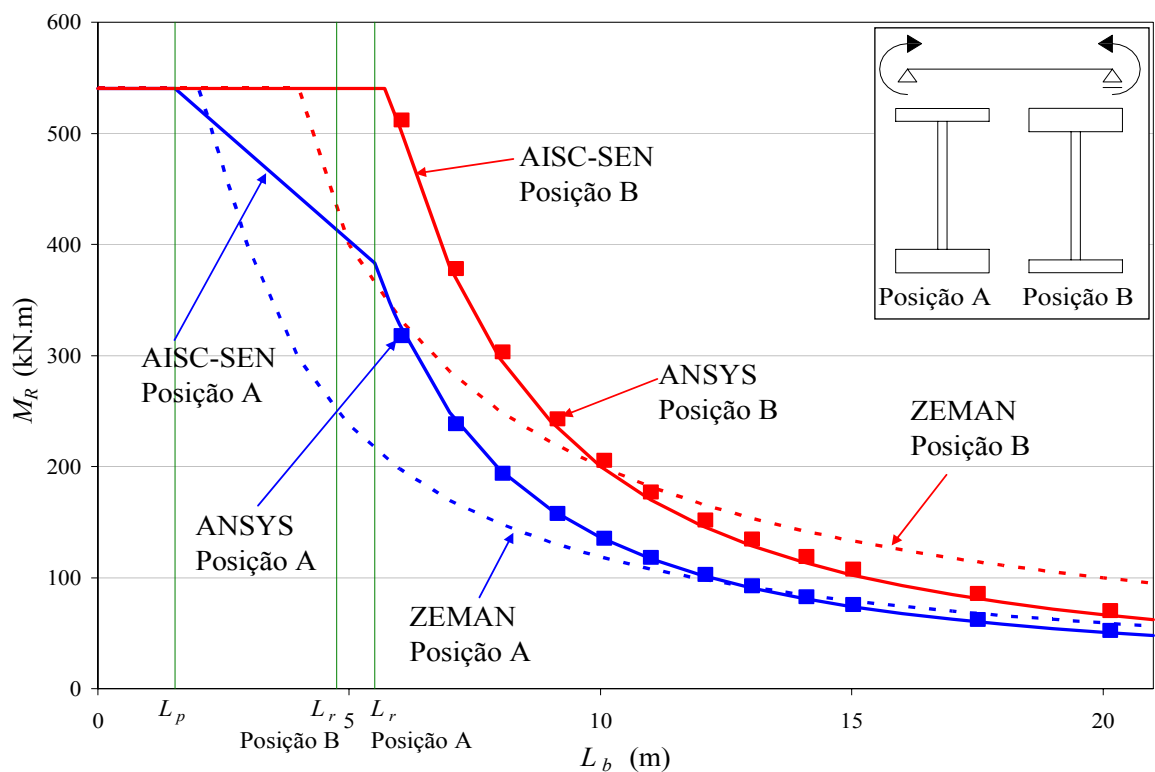


Figura 4.39 – Valores de  $M_R$  para o caso 1 na seção I monossimétrica

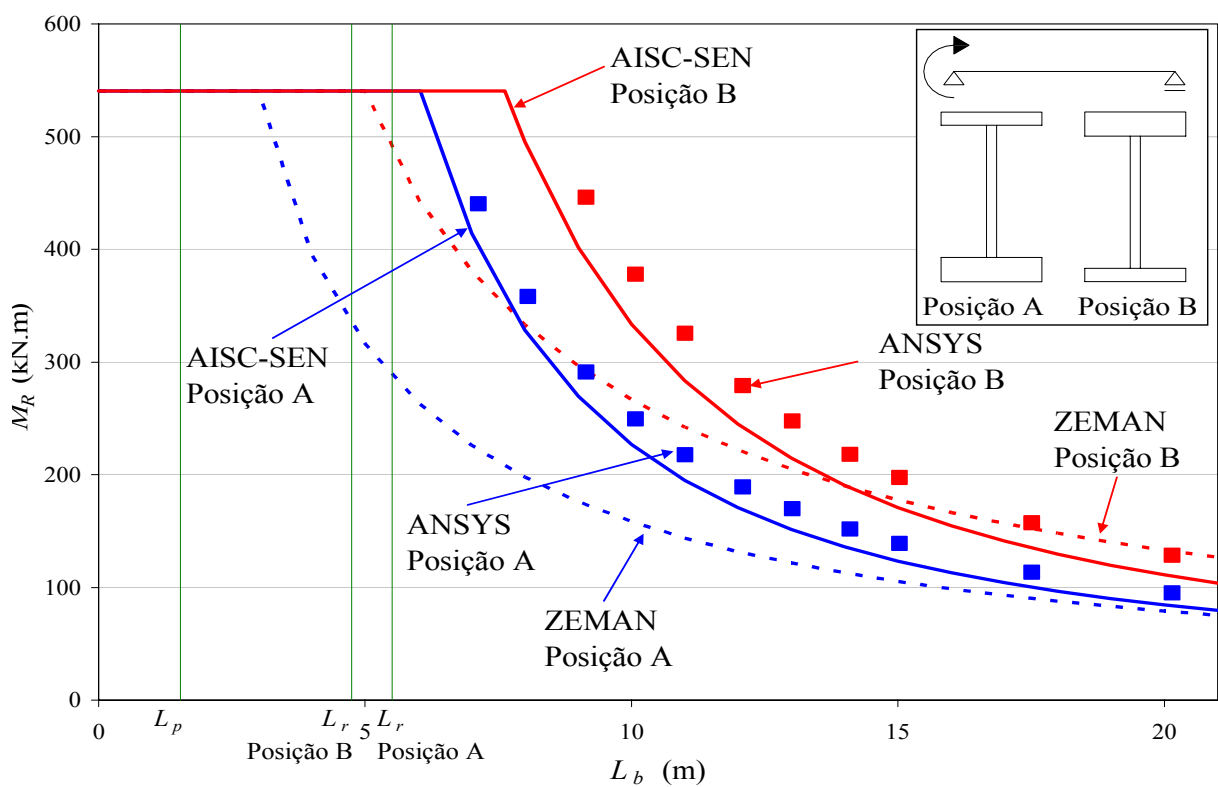


Figura 4.40 – Valores de  $M_R$  para o caso 2 na seção I monossimétrica

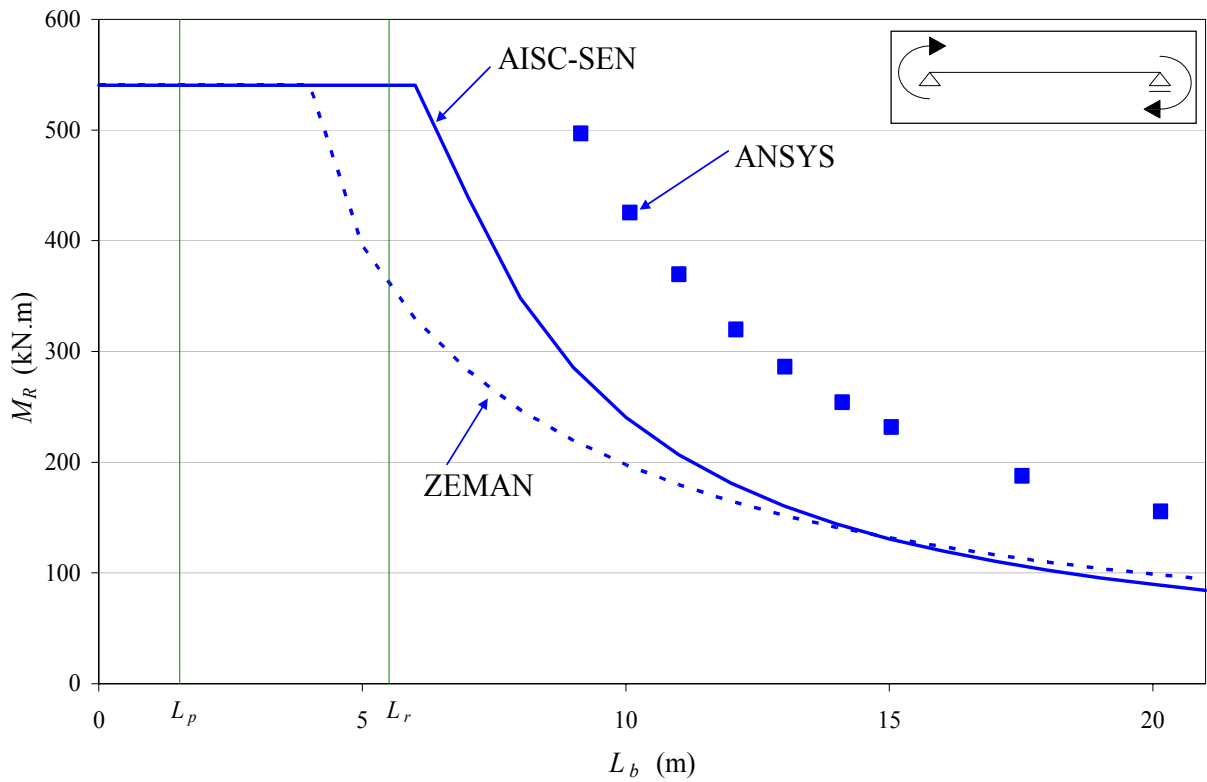


Figura 4.41 – Valores de  $M_R$  para o caso 3 na seção I monossimétrica

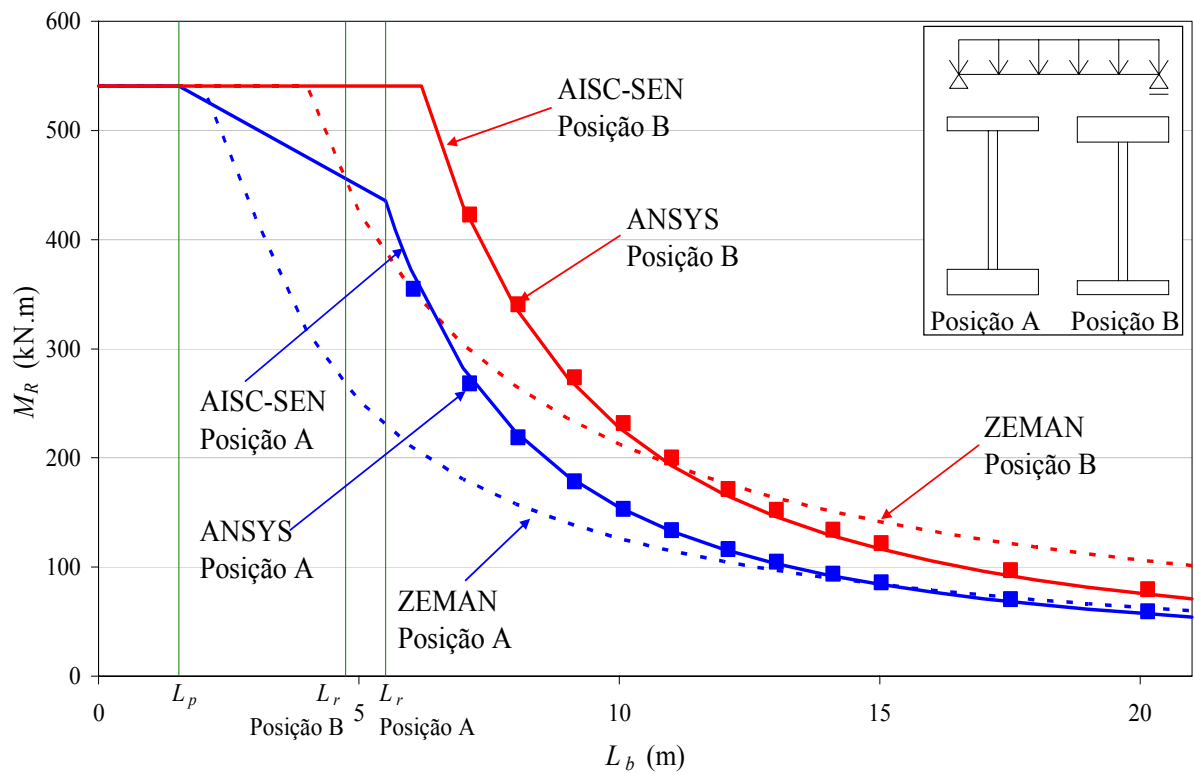


Figura 4.42 – Valores de  $M_R$  para o caso 4 na seção I monossimétrica com cargas na meia-altura da seção transversal

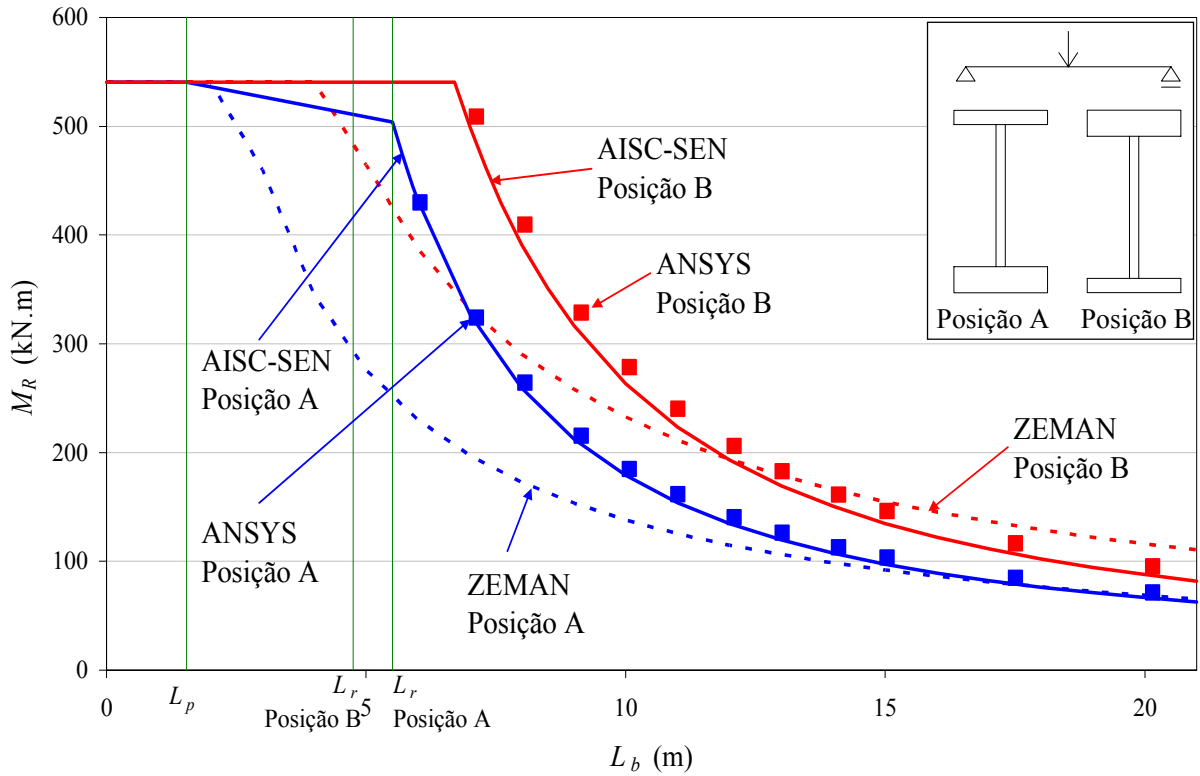


Figura 4.43 – Valores de  $M_R$  para o caso 5 na seção I monossimétrica com cargas na meia-altura da seção transversal

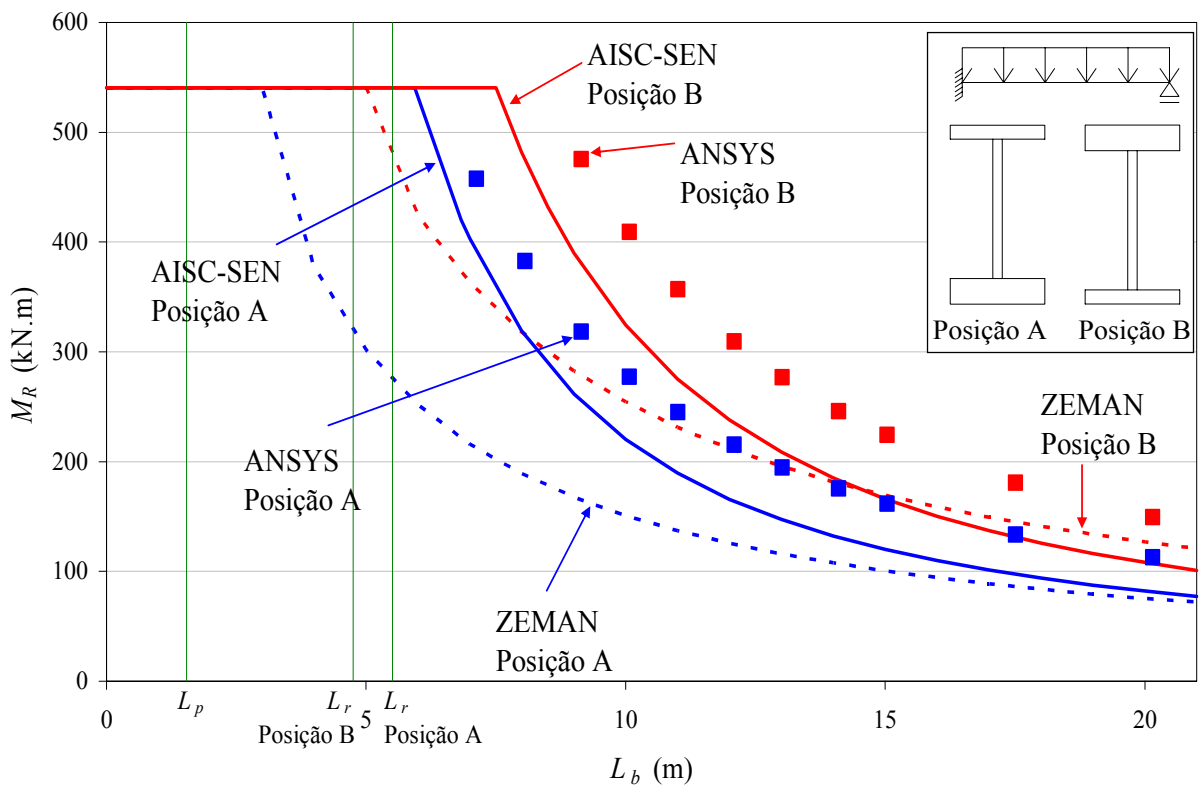


Figura 4.44 – Valores de  $M_R$  para o caso 6 na seção I monossimétrica com cargas na meia-altura da seção transversal

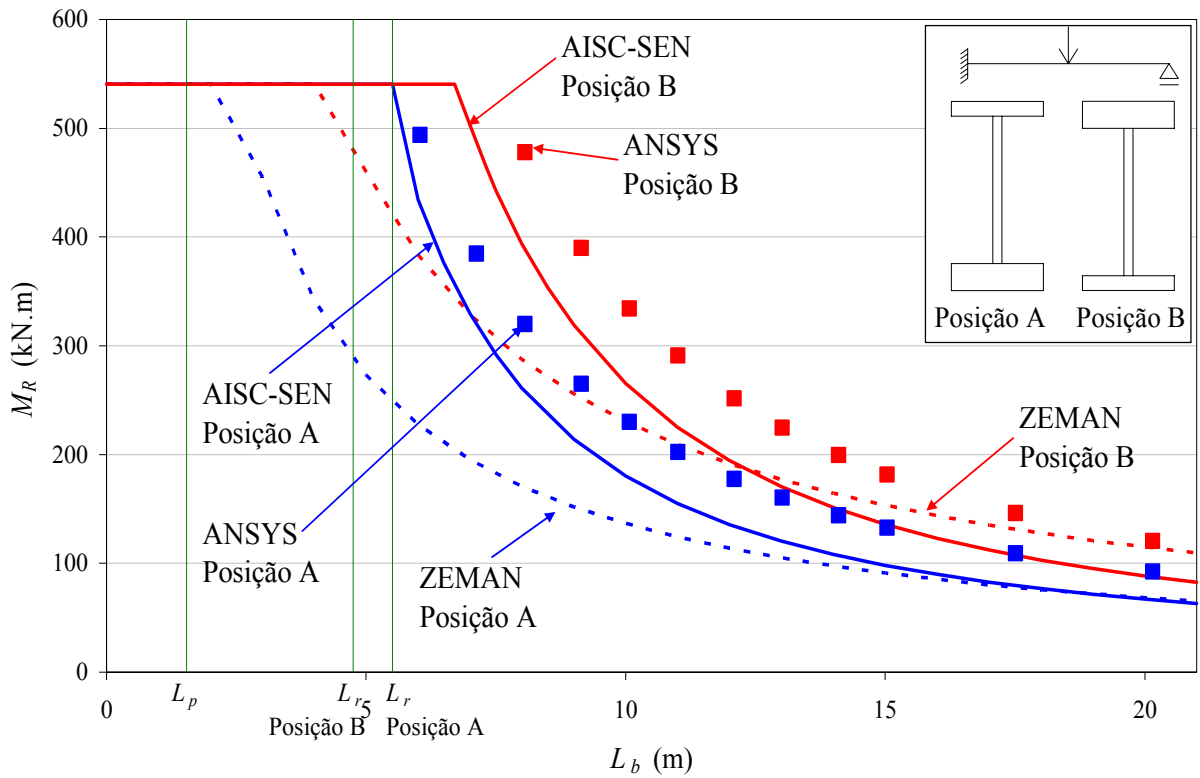


Figura 4.45 – Valores de  $M_R$  para o caso 7 na seção I monossimétrica com cargas na meia-altura da seção transversal

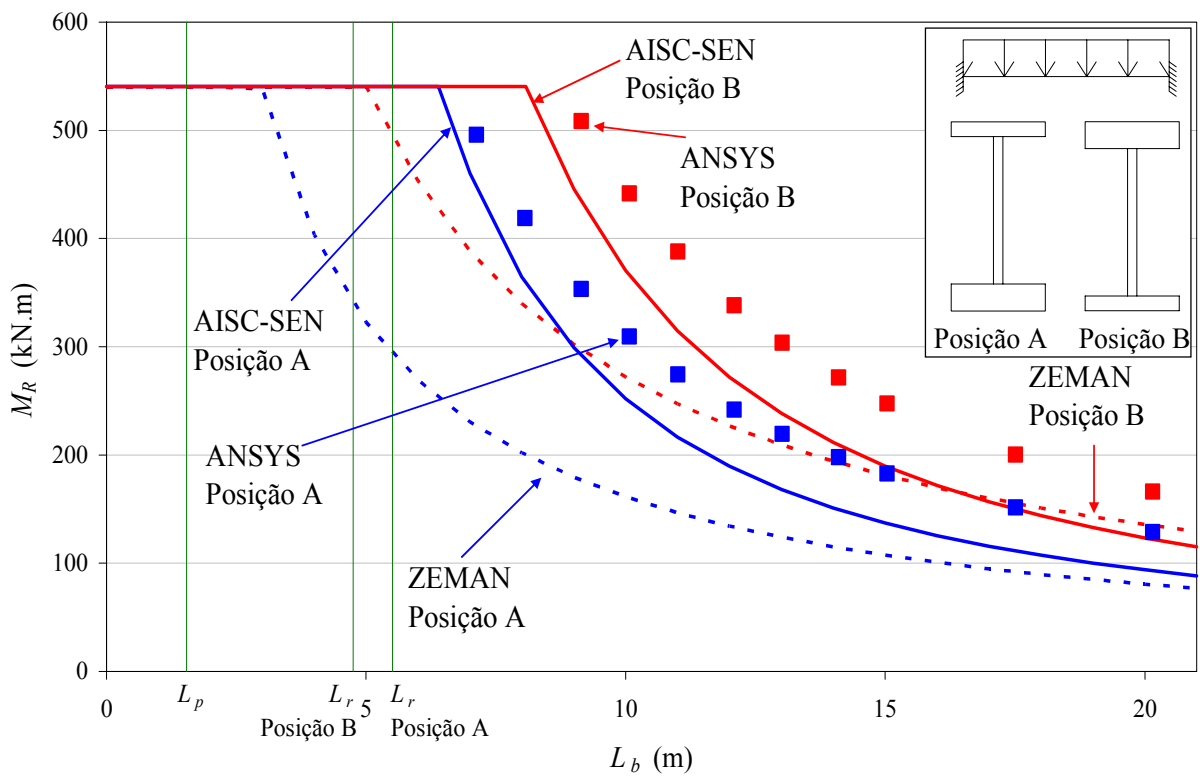


Figura 4.46 – Valores de  $M_R$  para o caso 8 na seção I monossimétrica com cargas na meia-altura da seção transversal

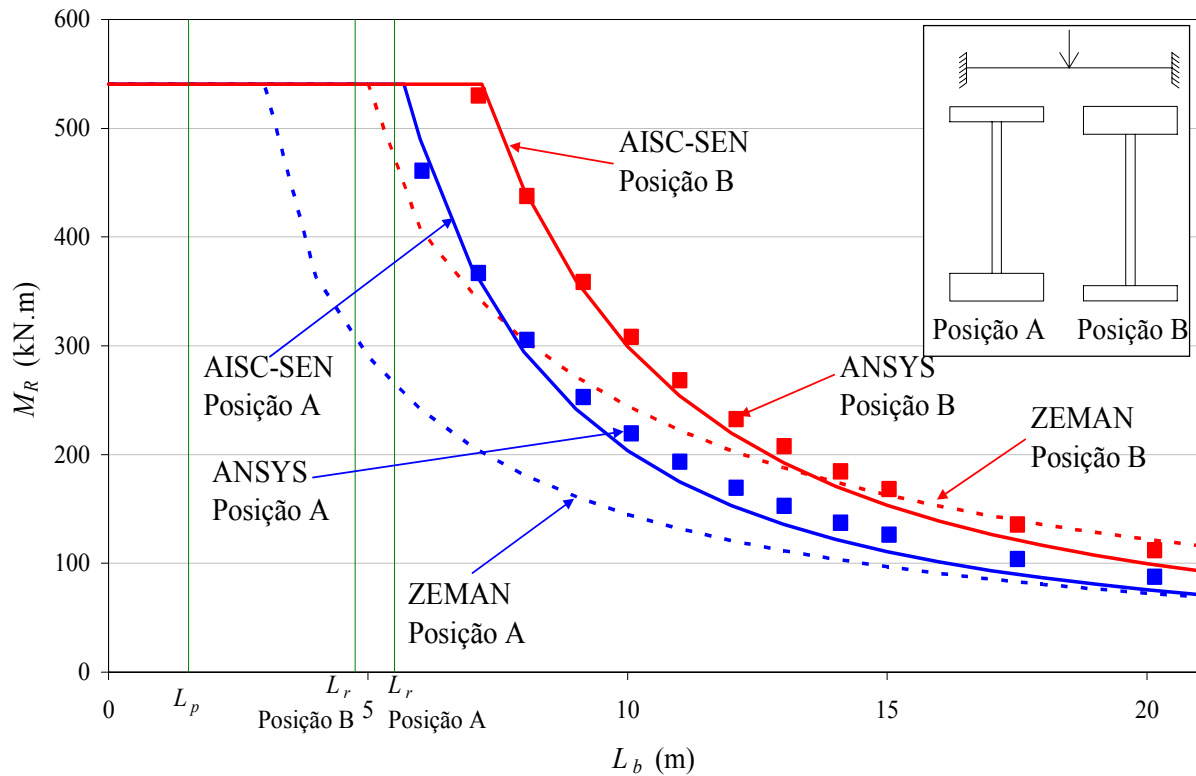


Figura 4.47 - Valores de  $M_R$  para o caso 9 na seção I monossimétrica com cargas na meia-altura da seção transversal

O procedimento simplificado da Zeman (1999) apresenta momentos resistentes inferiores aos do ANSYS 9.0 (2004) e também aos do AISC-SEN na maioria dos comprimentos destravados em todos os casos de carregamento considerados, levando a resultados demasiadamente favoráveis à segurança.

Ainda de maneira similar à viga de seção duplamente simétrica, o procedimento AISC-SEN apresenta resultados muito próximos dos obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004) nos casos 1, 4, 5 e 9, tanto para a Posição A como para a Posição B. Mostra-se conservador nos demais casos (2, 3, 6, 7, 8). Um estudo adicional foi feito, procurando esclarecer a razão desta última constatação, usando o programa computacional MCE, desenvolvido na UFMG por Reis (1996). Ficou evidenciado que o problema está também no valor do fator  $C_b$ , dado pela Equação (2.4) no procedimento AISC-SEN, o que tem valor fixo e sempre inferior quando comparado com o valor mais correto fornecido pelo programa MCE, que varia em função do vão da viga, todos esses valores de  $C_b$ , conforme pode ser visto na Tabela 4.3, na região elástica delimitada pelo procedimento AISC-SEN.

Tabela 4.3 – Valores de  $C_b$  para viga monossimétrica

Valores de $C_b$																			
Caso 2				Caso 3				Caso 6				Caso 7				Caso 8			
Equação (2.4)				Equação (2.4)				Equação (2.4)				Equação (2.4)				Equação (2.4)			
1,67				1,77				1,62				1,33				1,85			
Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE		Programa MCE			
Posição A		Posição B		Programa MCE		Posição A		Posição B		Posição A		Posição B		Posição A		Posição B			
$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$		
7,130	1,86	7,130	-	7,130	-	7,130	-	7,130	-	7,130	1,88	7,130	-	7,130	-	7,130	-		
8,060	1,85	8,060	-	8,060	-	8,060	2,31	8,060	-	8,060	1,88	8,060	1,73	8,060	2,70	8,060	-		
9,145	1,85	9,145	2,86	9,145	3,21	9,145	2,30	9,145	2,18	9,145	1,87	9,145	1,74	9,145	2,69	9,145	-		
10,075	1,85	10,075	2,82	10,075	3,19	10,075	2,30	10,075	2,19	10,075	1,87	10,075	1,74	10,075	2,69	10,075	2,47		
11,005	1,85	11,005	2,79	11,005	3,17	11,005	2,30	11,005	2,19	11,005	1,87	11,005	1,74	11,005	2,69	11,005	2,47		
12,090	1,84	12,090	2,75	12,090	3,15	12,090	2,29	12,090	2,19	12,090	1,86	12,090	1,75	12,090	2,68	12,090	2,48		
13,020	1,84	13,020	2,71	13,020	3,13	13,020	2,29	13,020	2,19	13,020	1,86	13,020	1,75	13,020	2,68	13,020	2,48		
14,105	1,84	14,105	2,67	14,105	3,10	14,105	2,29	14,105	2,20	14,105	1,86	14,105	1,75	14,105	2,67	14,105	2,49		
15,035	1,83	15,035	2,64	15,035	3,09	15,035	2,28	15,035	2,20	15,035	1,85	15,035	1,75	15,035	2,67	15,035	2,49		
17,515	1,83	17,515	2,56	17,515	3,04	17,515	2,27	17,515	2,20	17,515	1,84	17,515	1,76	17,515	2,66	17,515	2,50		
20,150	1,82	20,150	2,49	20,150	3,00	20,150	2,27	20,150	2,21	20,150	1,84	20,150	1,77	20,150	2,65	20,150	2,51		

As comparações dos resultados numéricos obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004) com o procedimento AISC-SEN (apenas a curva no regime elástico) usando o  $C_b$  fornecido pelo programa MCE encontram-se apresentadas nas Figuras 4.48 a 4.52, respectivamente para os casos 2, 3, 6, 7 e 8.

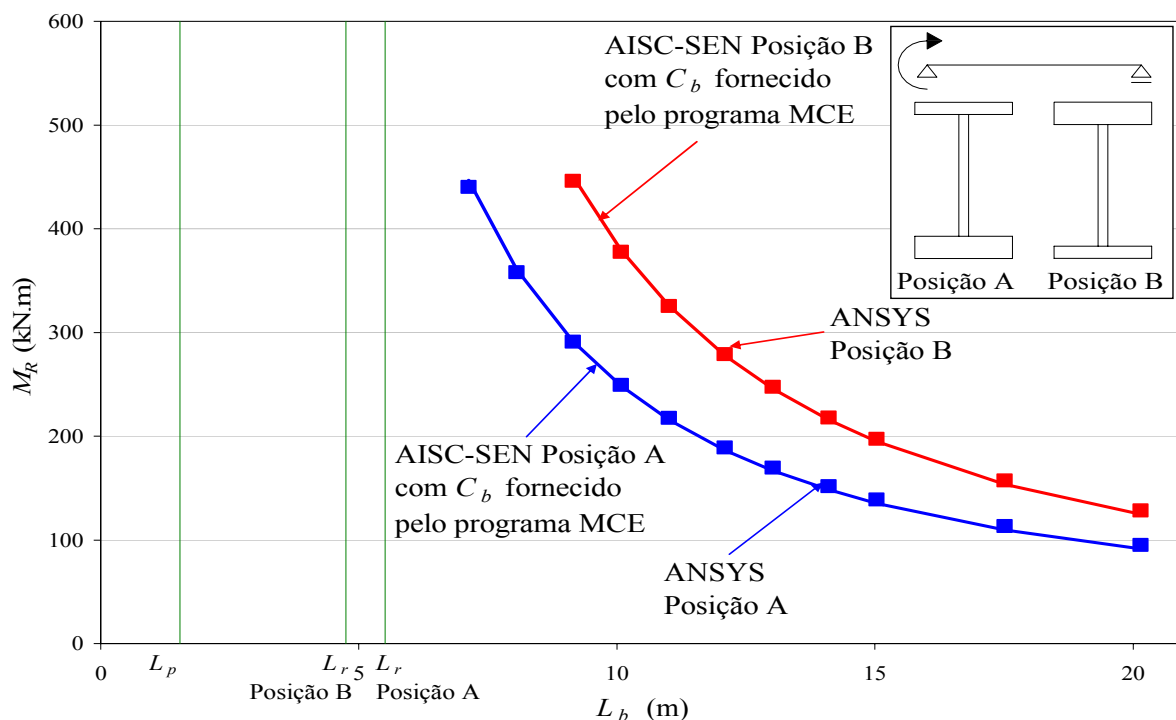


Figura 4.48 – Comparação do caso 2 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004)



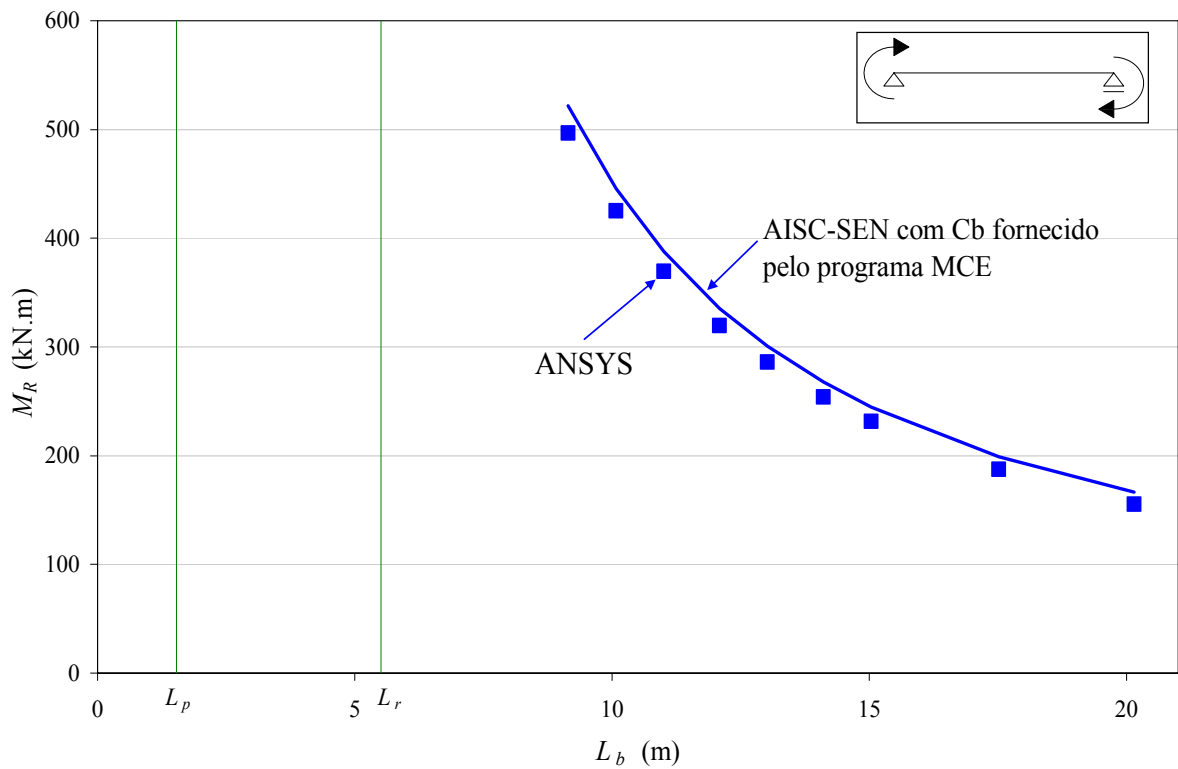


Figura 4.49 – Comparação do caso 3 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004)

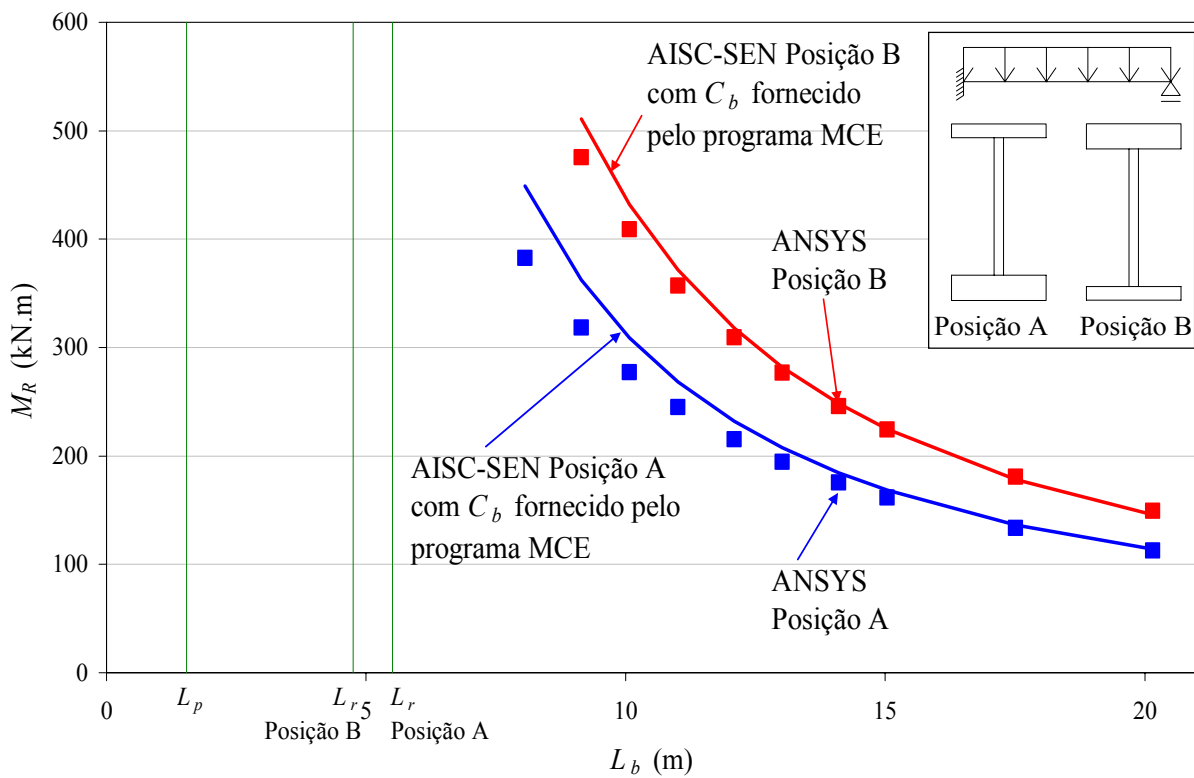


Figura 4.50 – Comparação do caso 6 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas na meia-altura da seção transversal

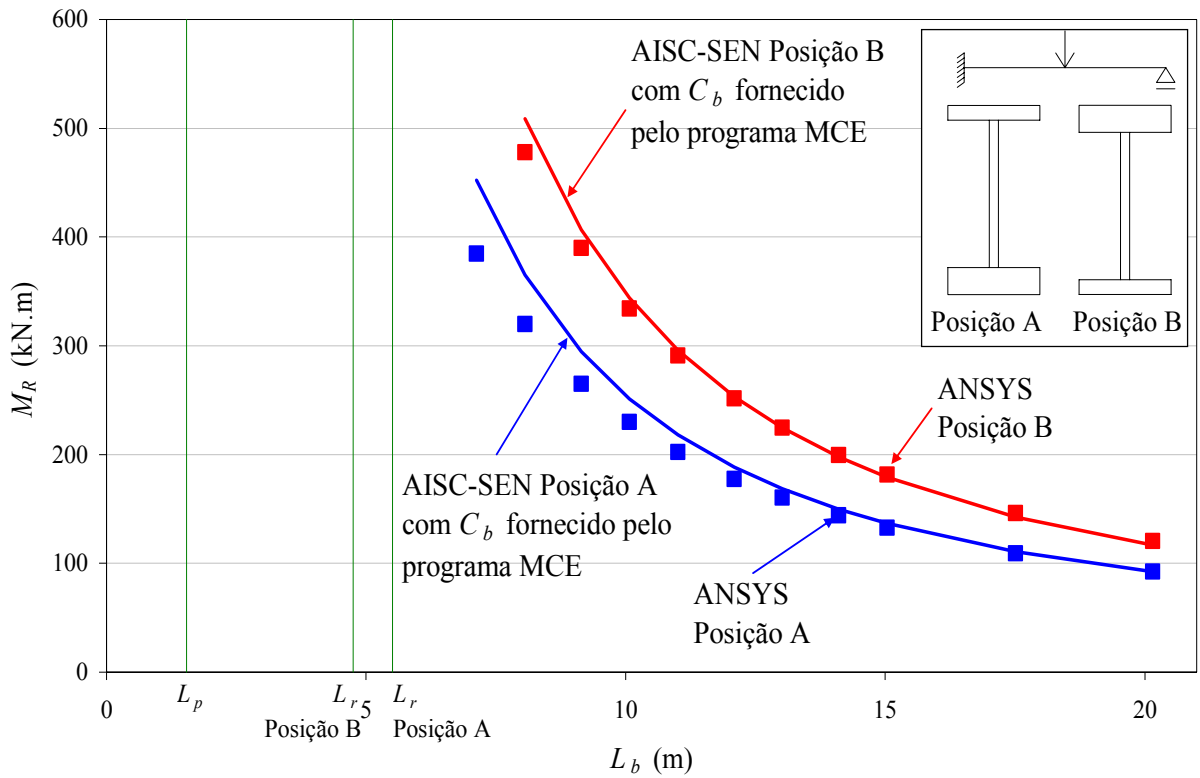


Figura 4.51 – Comparação do caso 7 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas na meia-altura da seção transversal

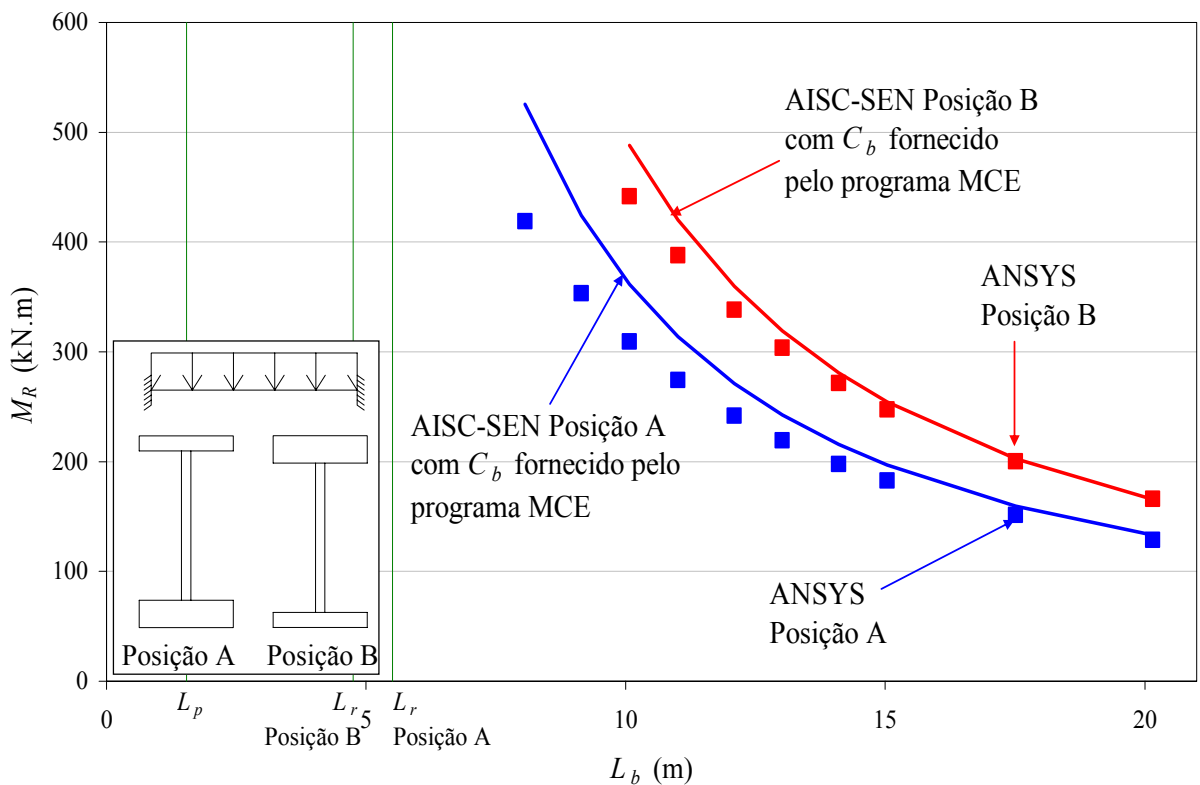


Figura 4.52 – Comparação do caso 8 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas na meia-altura da seção transversal

Observa-se que os valores dos momentos resistentes usando  $C_b$  fornecido pelo programa MCE, no procedimento AISC-SEN, aproxima-se dos valores numéricos obtidos pelo programa ANSYS 9.0 (2004), nas duas posições consideradas, para o caso 2. No caso 3 e Posições A e B para os casos 6, 7 e 8, os resultados do procedimento AISC-SEN, são ligeiramente maiores que os resultados obtidos pelo programa ANSYS 9.0 (2004). Esse fato se dá em decorrência do procedimento AISC-SEN desprezar o efeito da distorção da alma na flambagem, conforme Ma & Hughes (1996), Hughes & Ma (1996) e Samanta & Kumar, (2005), e a alma nas propriedades geométricas da seção transversal.

#### 4.3.2. Cargas Transversais Aplicadas na Face Inferior (Estabilizantes)

As Figuras 4.53 a 4.58 mostram, respectivamente para os casos 4 a 9, os valores de  $M_R$  calculados pelos procedimentos AISC-SEN e da Zeman (1999) e também os resultados fornecidos pelo programa ANSYS 9.0 (2004) para os comprimentos da viga em que a flambagem ocorre no regime elástico delimitado pelo procedimento AISC-SEN. No procedimento da Zeman (1999), assim como para a viga de seção duplamente simétrica, o valor do coeficiente  $k_c$  é dado pelo inverso da raiz quadrada do coeficiente  $C_b$ .

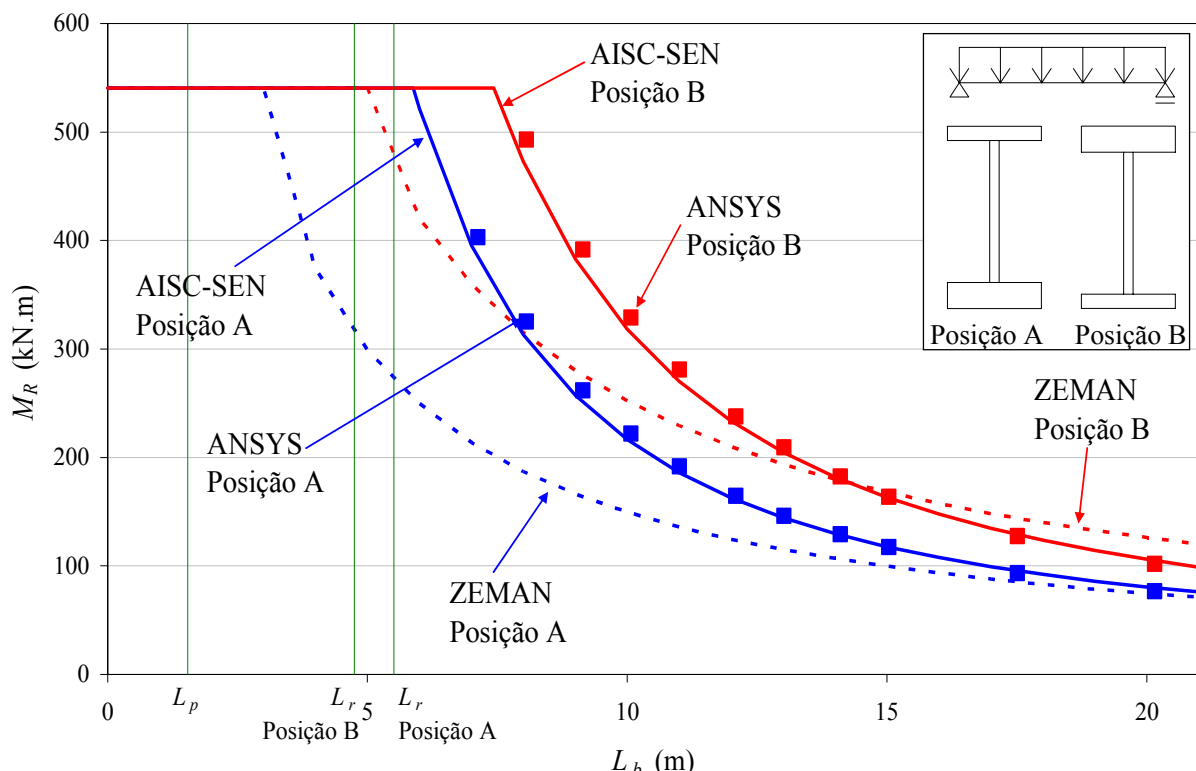


Figura 4.53 – Valores de  $M_R$  para o caso 4 e seção I monossimétrica com cargas estabilizantes

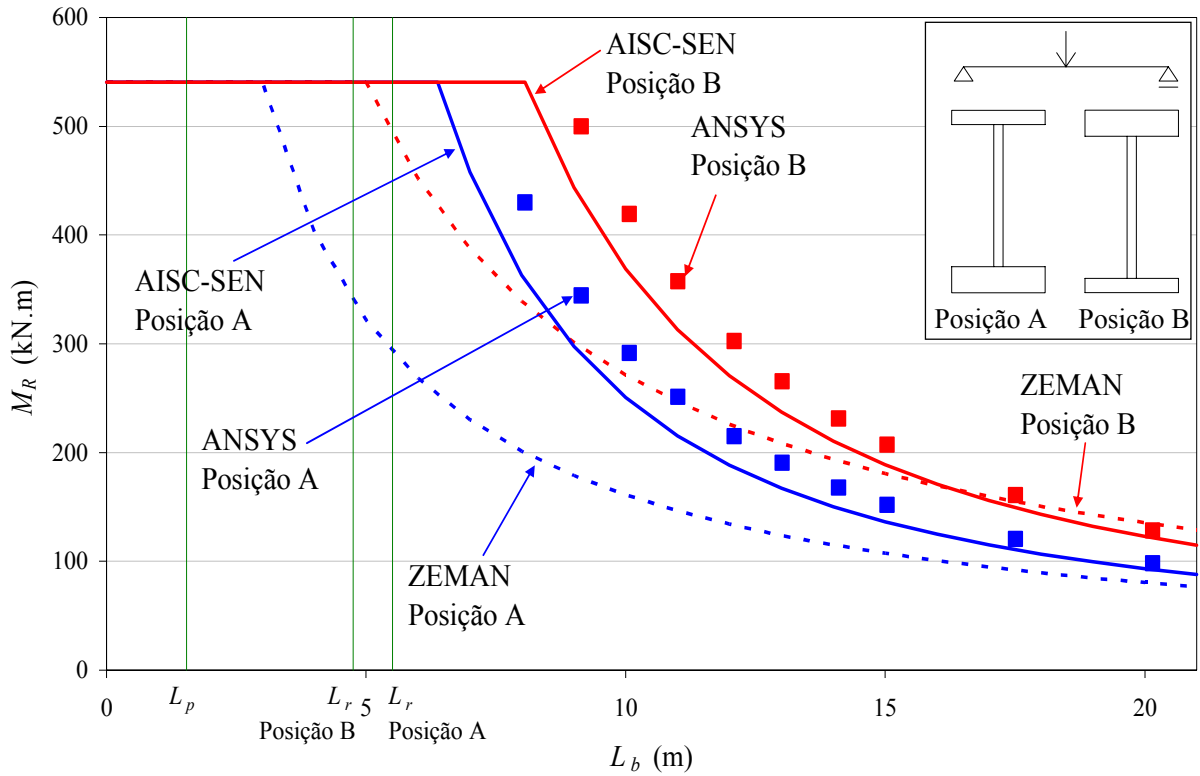


Figura 4.54 – Valores de  $M_R$  para o caso 5 e seção I monossimétrica com cargas estabilizantes

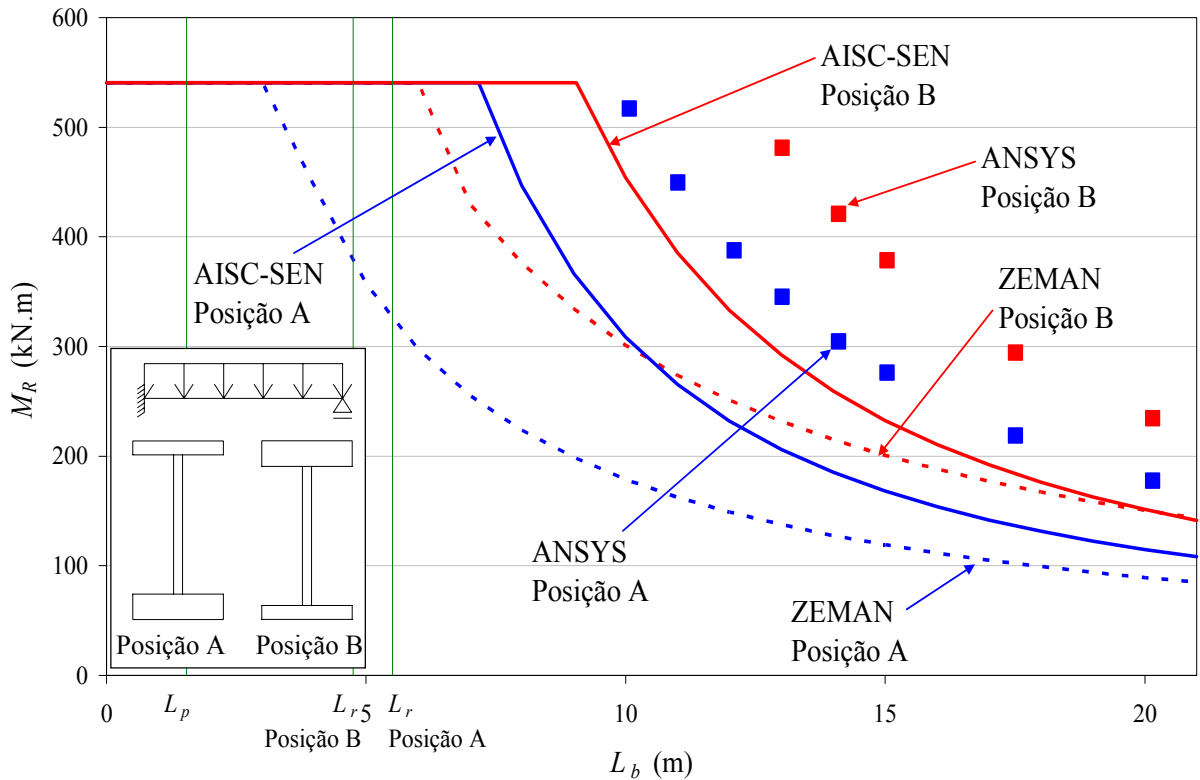


Figura 4.55 – Valores de  $M_R$  para o caso 6 e seção I monossimétrica com cargas estabilizantes

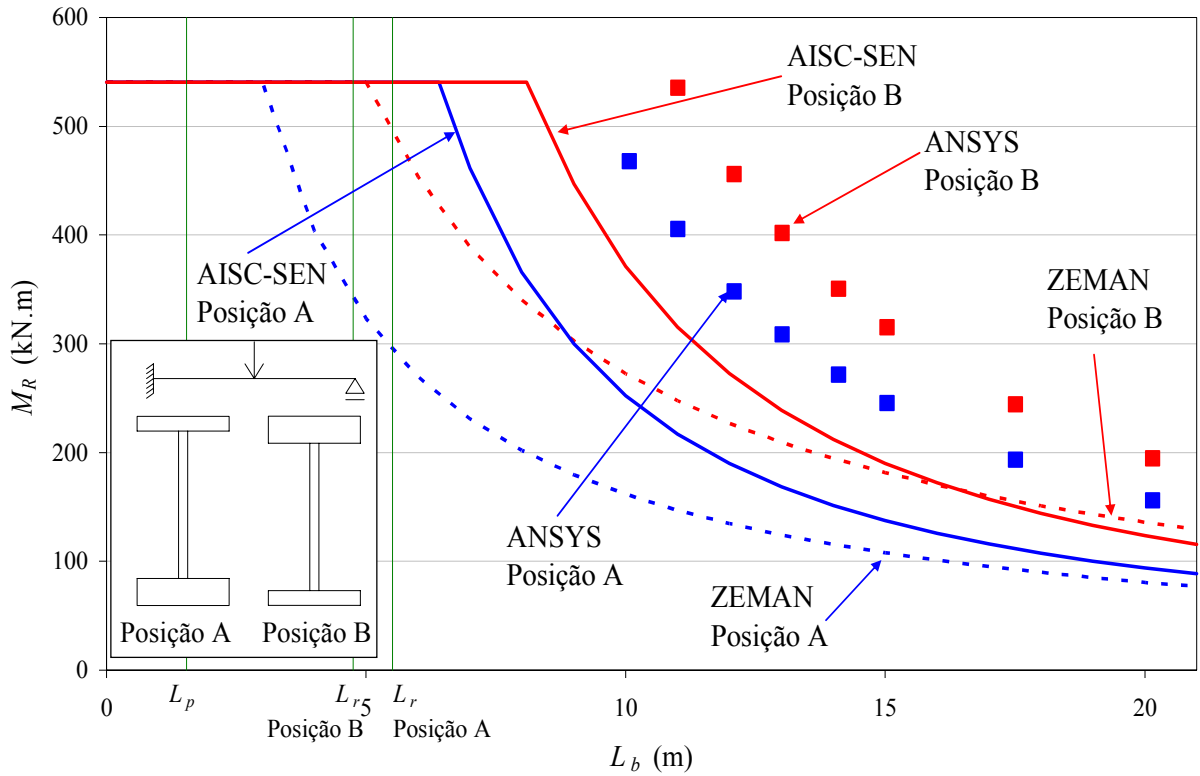


Figura 4.56 – Valores de  $M_R$  para o caso 7 e seção I monossimétrica com cargas estabilizantes

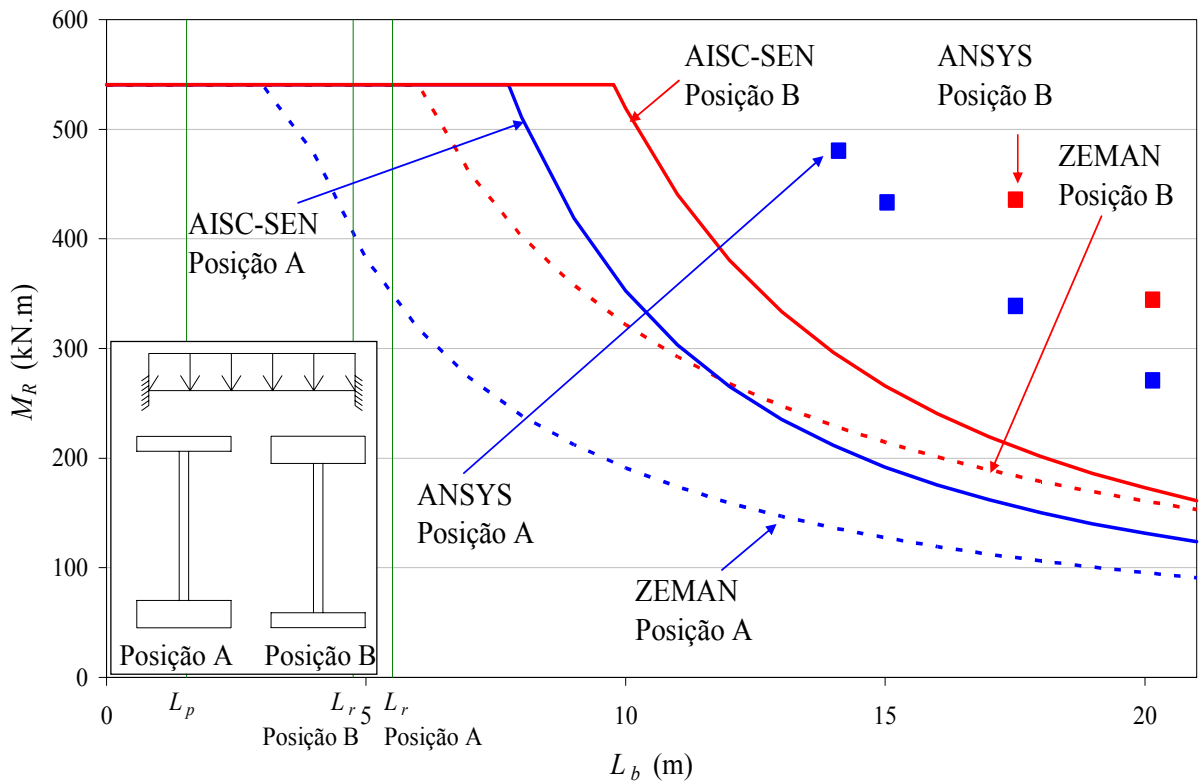


Figura 4.57 – Valores de  $M_R$  para o caso 8 e seção I monossimétrica com cargas estabilizantes

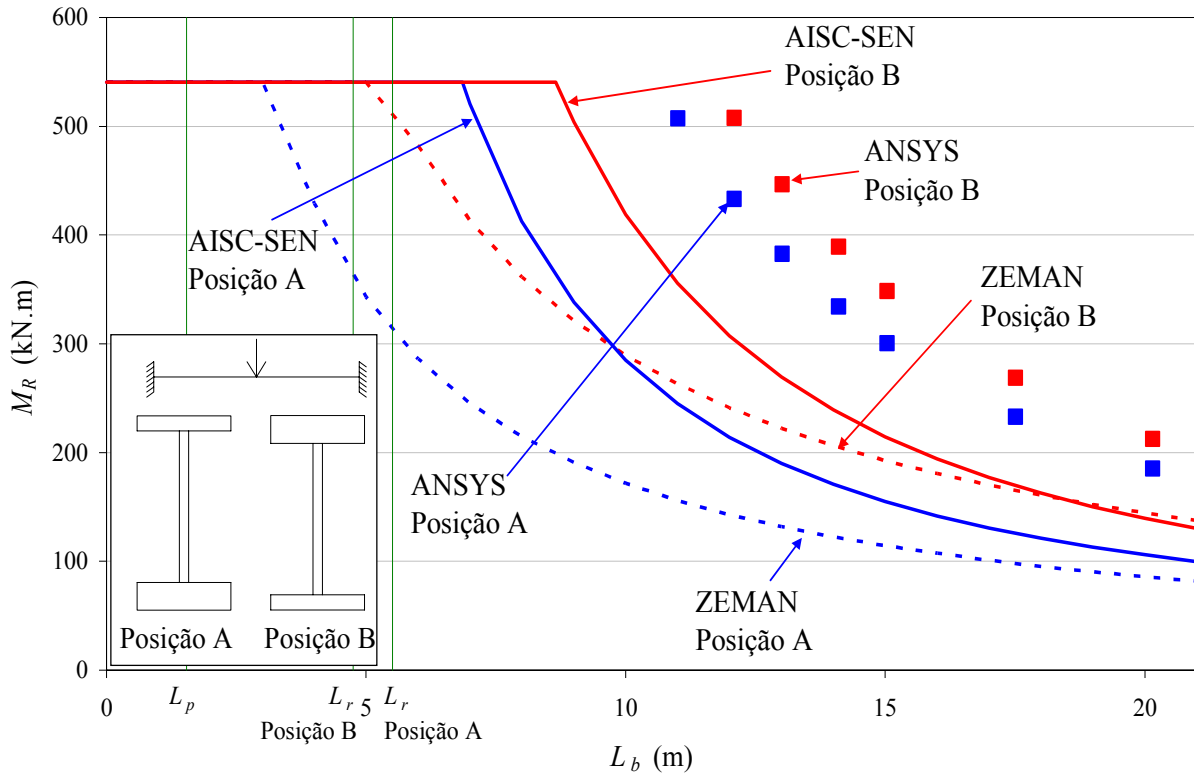


Figura 4.58 – Valores de  $M_R$  para o caso 9 e seção I monossimétrica com cargas estabilizantes

Nota-se que o procedimento simplificado da Zeman (1999) apresenta momentos resistentes quase sempre inferiores aos do ANSYS 9.0 (2004), portanto favoráveis à segurança. Vale ressaltar, porém, que o procedimento da Zeman (1999) não prevê cargas estabilizantes e para realização deste estudo, o cálculo do coeficiente  $k_c$  foi tomado igual ao inverso da raiz quadrada do  $C_b$  dado pela Equação (2.4). Adicionalmente o procedimento da Zeman (1999) recomenda o uso da curva de resistência da DIN 18800 (1990), que apresenta algumas deformidades nos resultados, conforme já foi explicitado no sub-item 4.2.1.

No caso 4, o procedimento AISC-SEN apresenta resultados próximos dos obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004). Nos casos 5, 6, 7, 8 e 9, o procedimento mostra-se conservador, tendo como motivo o fato de o valor de  $C_b$ , dado pela Equação (2.4), ser aproximado. Um estudo adicional foi feito, usando procedimento AISC-SEN com o coeficiente  $C_b$  determinado com o programa MCE, desenvolvido por Reis (1996). A Tabela 4.4 apresenta os valores de  $C_b$  calculado pela Equação (2.4) para o procedimento AISC-SEN e os valores encontrados usando o programa MCE, para os comprimentos da viga em que a flambagem ocorre no regime elástico delimitado pelo procedimento AISC-SEN.

Tabela 4.4 – Valores de  $C_b$  para viga monossimétrica, cargas estabilizantes

Valores de $C_b$																			
Caso 5				Caso 6				Caso 7				Caso 8				Caso 9			
Equação (2.4)				Equação (2.4)				Equação (2.4)				Equação (2.4)				Equação (2.4)			
1,84				2,27				1,86				2,59				2,09			
Programa MCE				Programa MCE				Programa MCE				Programa MCE				Programa MCE			
Posição A		Posição B		Posição A		Posição B		Posição A		Posição B		Posição A		Posição B		Posição A		Posição B	
$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$
8,060	2,25	8,060	-	8,060	-	8,060	-	8,060	-	8,060	-	8,060	-	8,060	-	8,060	-	8,060	-
9,145	2,22	9,145	2,08	9,145	-	9,145	-	9,145	-	9,145	-	9,145	-	9,145	-	9,145	-	9,145	-
10,075	2,19	10,075	2,06	10,075	-	10,075	-	10,075	-	10,075	-	10,075	-	10,075	-	10,075	-	10,075	-
11,005	2,16	11,005	2,04	11,005	4,47	11,005	-	11,005	3,96	11,005	-	11,005	-	11,005	-	11,005	-	11,005	-
12,090	2,12	12,090	2,01	12,090	4,36	12,090	-	12,090	3,86	12,090	3,32	12,090	-	12,090	-	12,090	4,94	12,090	-
13,020	2,09	13,020	1,99	13,020	4,27	13,020	4,05	13,020	3,77	13,020	3,27	13,020	-	13,020	-	13,020	4,80	13,020	3,69
14,105	2,06	14,105	1,97	14,105	4,17	14,105	3,98	14,105	3,67	14,105	3,22	14,105	-	14,105	-	14,105	4,65	14,105	3,62
15,035	2,03	15,035	1,95	15,035	4,09	15,035	3,92	15,035	3,60	15,035	3,18	15,035	6,91	15,035	-	15,035	4,52	15,035	3,56
17,515	1,97	17,515	1,90	17,515	3,89	17,515	3,77	17,515	3,41	17,515	3,06	17,515	6,43	17,515	5,95	17,515	4,21	17,515	3,41
20,150	1,91	20,150	1,85	20,150	3,70	20,150	3,63	20,150	3,24	20,150	2,95	20,150	6,00	20,150	5,65	20,150	3,94	20,150	3,27

Comparações entre os resultados do momento resistente obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004) pelo procedimento AISC-SEN (apenas no regime elástico) usando o  $C_b$  fornecido pelo programa MCE estão apresentadas nas Figuras 4.59 a 4.63, respectivamente para os casos 5 a 9.

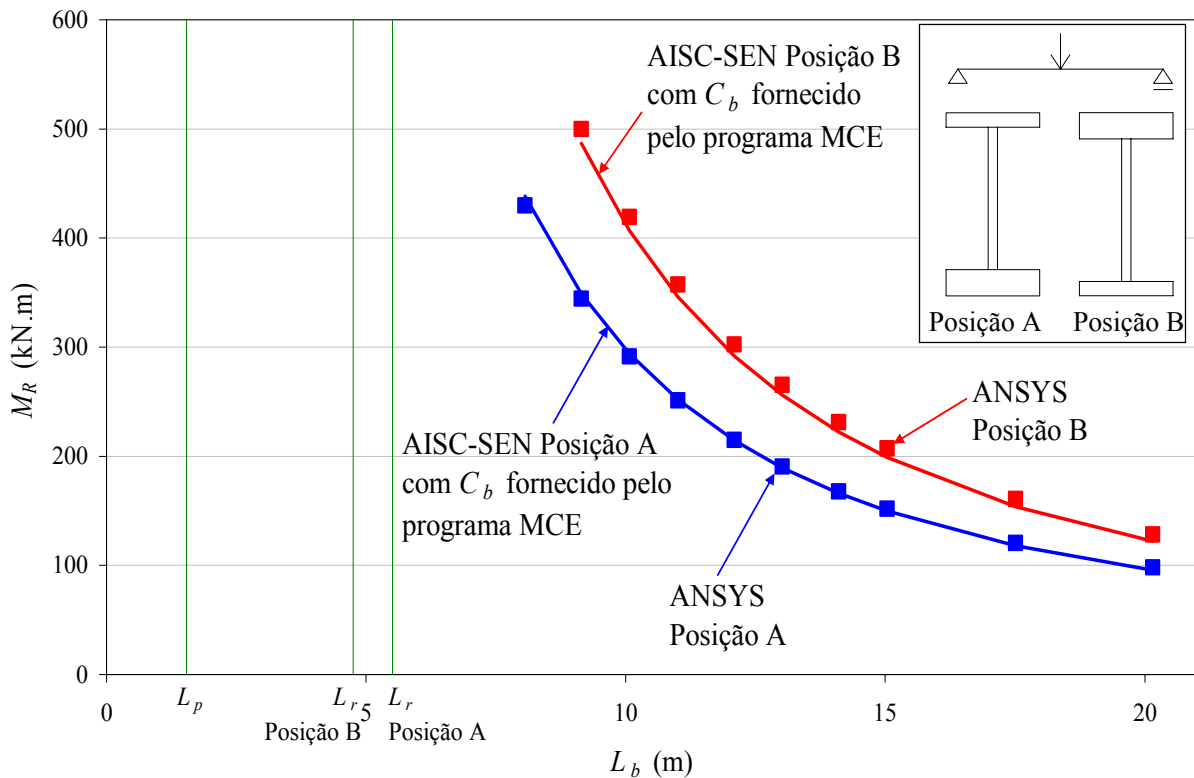


Figura 4.59 – Comparação do caso 5 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes

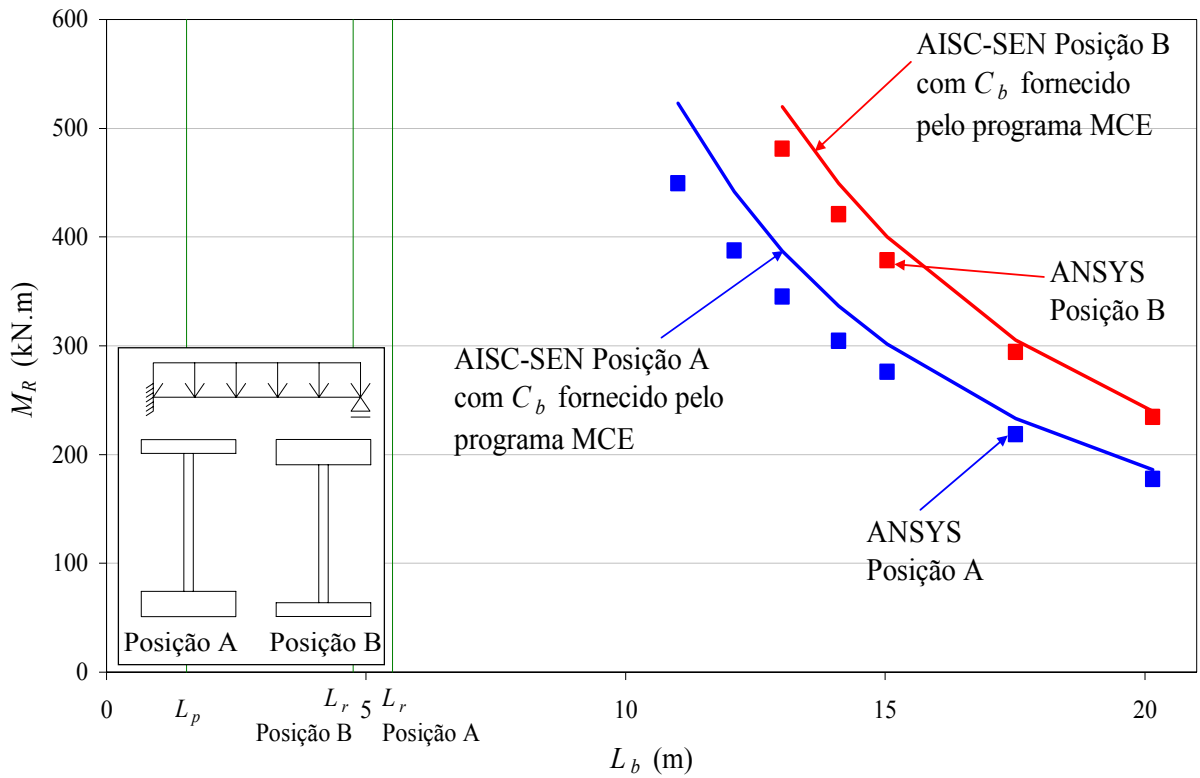


Figura 4.60 – Comparação do caso 6 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes

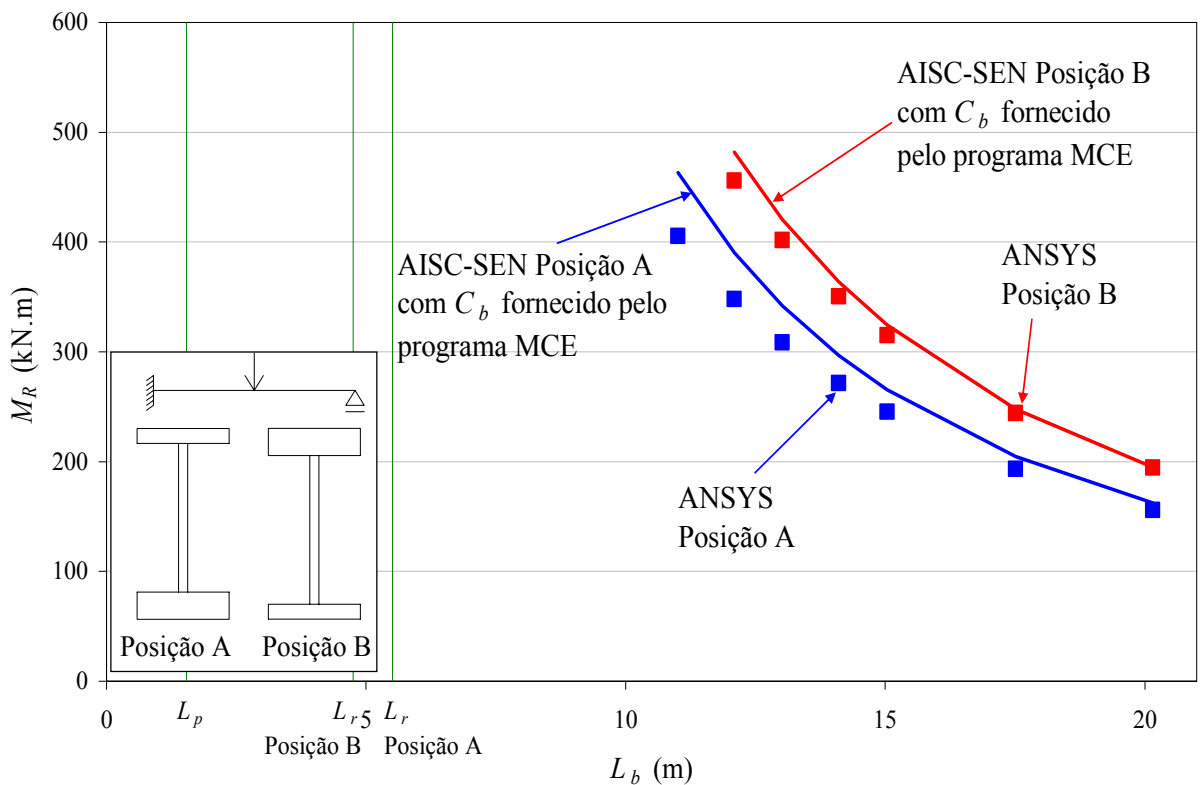


Figura 4.61 – Comparação do caso 7 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes



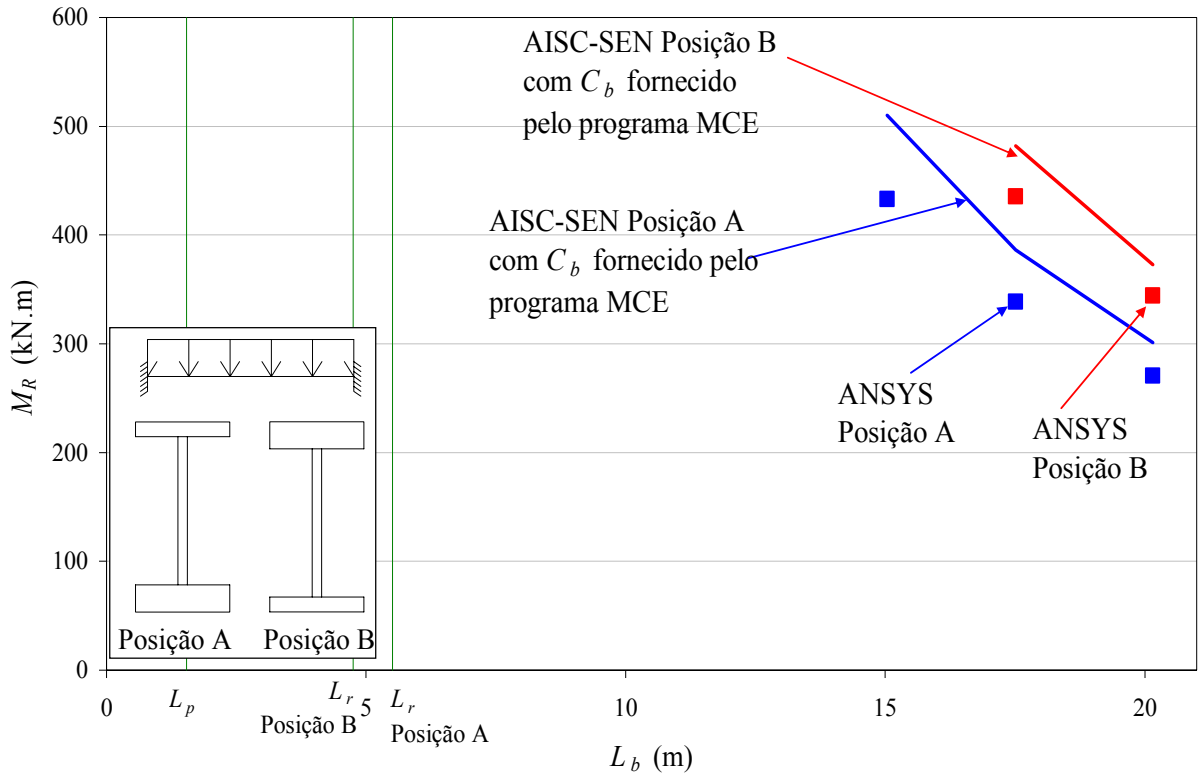


Figura 4.62 Comparação do caso 8 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes

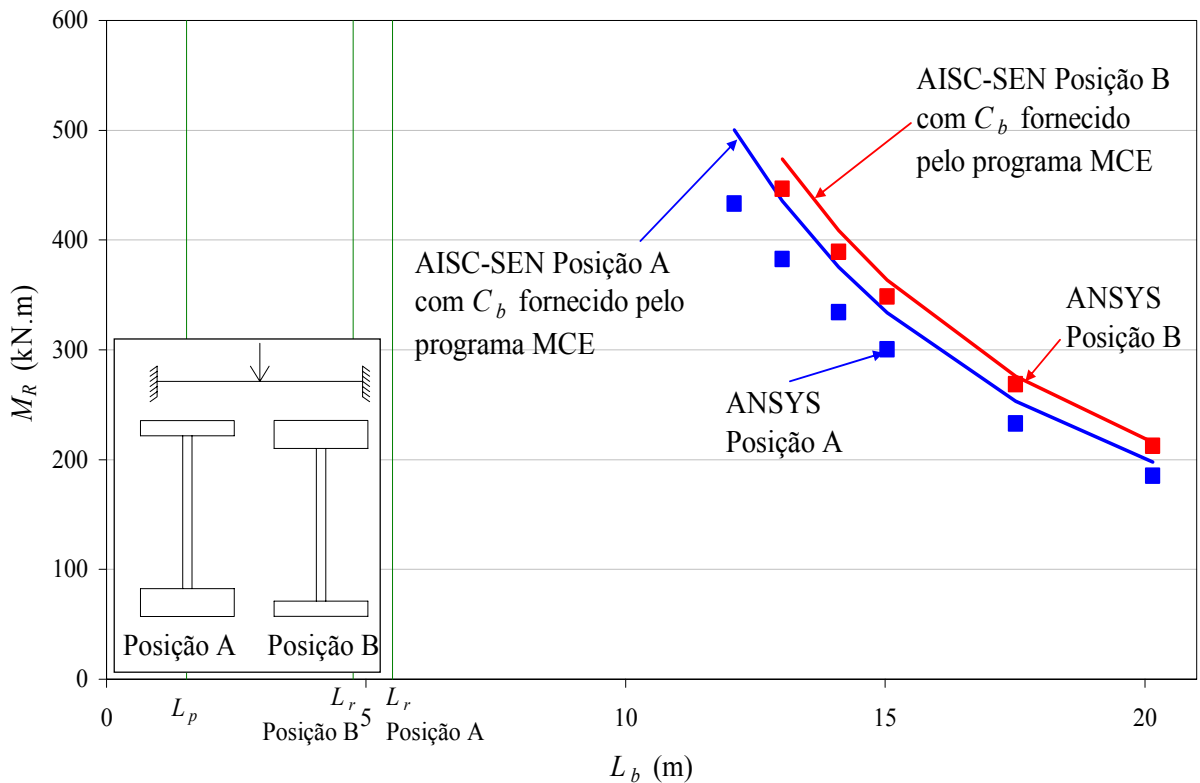


Figura 4.63 – Comparação do caso 9 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas estabilizantes

Examinando as Figuras 4.59 a 4.63, verificou-se que os valores dos momentos resistentes, usando  $C_b$  fornecido pelo programa MCE no procedimento AISC-SEN, aproximaram-se dos valores numéricos obtidos pelo programa ANSYS 9.0 (2004), para o caso 5 nas duas posições consideradas, A e B. Para os casos 6, 7, 8 e 9, nas Posições A e B, os resultados do procedimento AISC-SEN são ligeiramente maiores que os resultados obtidos numericamente pelo programa ANSYS 9.0 (2004). Como em outras situações vista neste trabalho, esse fato se dá em consequência do procedimento AISC-SEN desprezar o efeito da distorção da alma na flambagem (Ma & Hughes 1996, Hughes & Ma 1996 e Samanta & Kumar, 2005), que é muito pronunciado quando atuam cargas estabilizantes, e a alma nas propriedades geométricas da seção transversal.

#### **4.3.3. Cargas Transversais Aplicadas na Face Superior (Desestabilizantes)**

No cálculo de  $M_R$ , no procedimento AISC-SEN, foi usado o valor de  $C_b$  fornecido pela Equação (2.4), de modo que o coeficiente  $R_a$  dado pela Equação (2.6) levasse em consideração as cargas desestabilizantes. Nos casos onde o momento provoca curvatura reversa (casos 6, 7, 8 e 9) foi ainda usado o valor adequado do coeficiente  $R_m$ , dado pela Equação (2.5). No procedimento da Zeman (1999), assim como para as cargas desestabilizantes na viga de seção duplamente simétrica, neste estudo, usou-se o coeficiente  $k_c$  igual ao inverso da raiz quadrada do  $C_b$  dado pela Equação (2.4).

Os valores de  $M_R$  para cargas desestabilizantes, calculados pelos procedimentos AISC-SEN e da Zeman (1999), encontram-se nas Figuras 4.64 a 4.69, respectivamente para os casos 4 a 9, indicados na Figura 3.2, e também os resultados fornecidos pelo programa ANSYS 9.0 (2004) para os comprimentos da viga em que a flambagem ocorre no regime elástico delimitado pelo procedimento AISC-SEN.

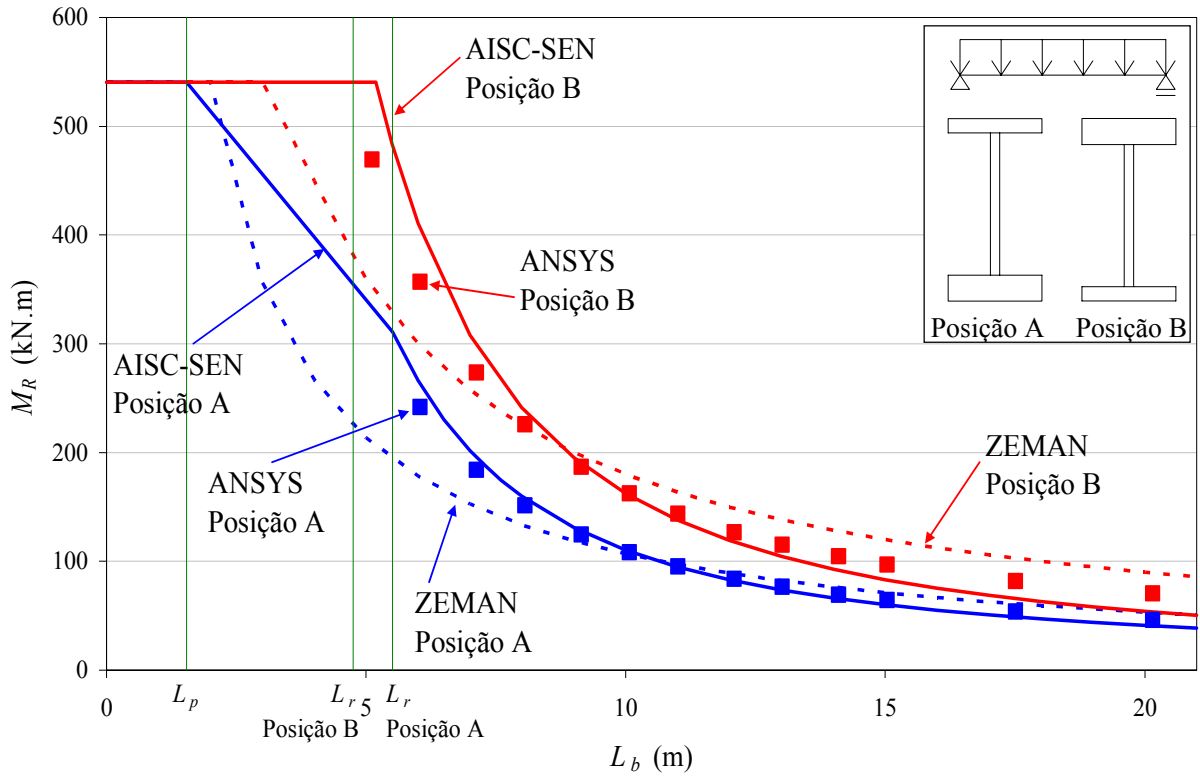


Figura 4.64 – Valores de  $M_R$  para o caso 4 e seção I monossimétrica com cargas desestabilizantes

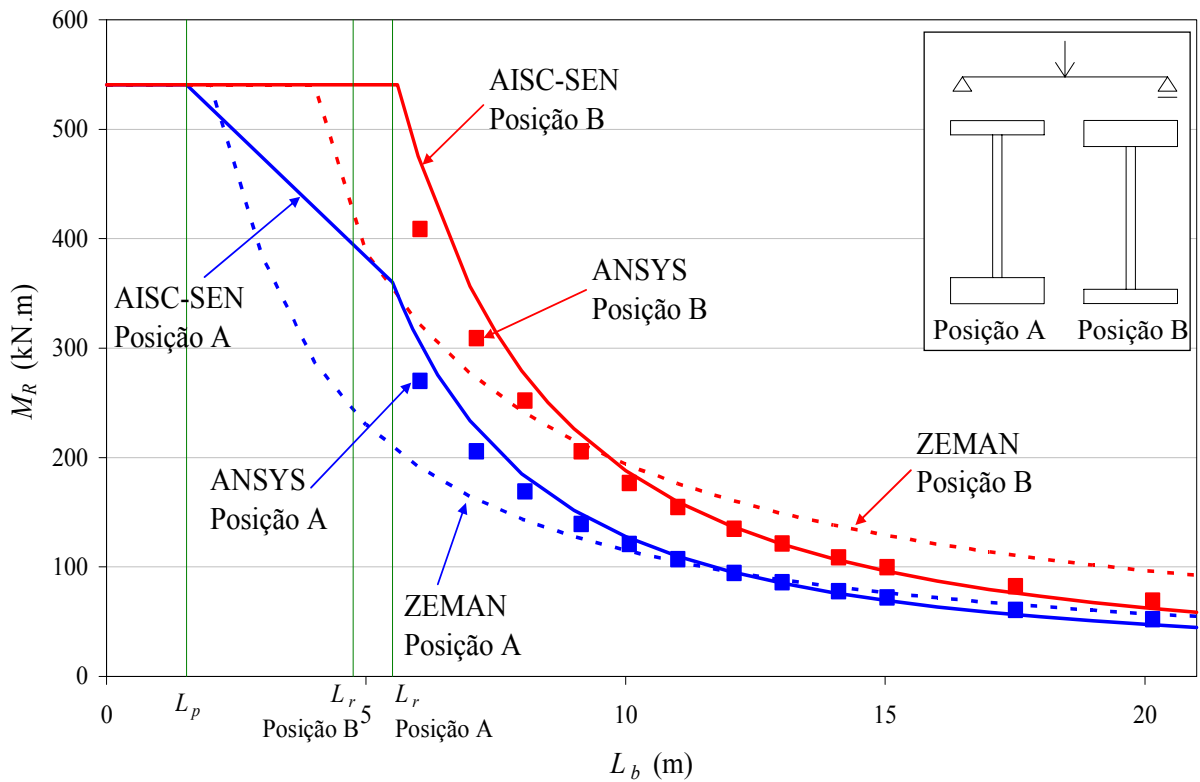


Figura 4.65 – Valores de  $M_R$  para o caso 5 e seção I monossimétrica com cargas desestabilizantes

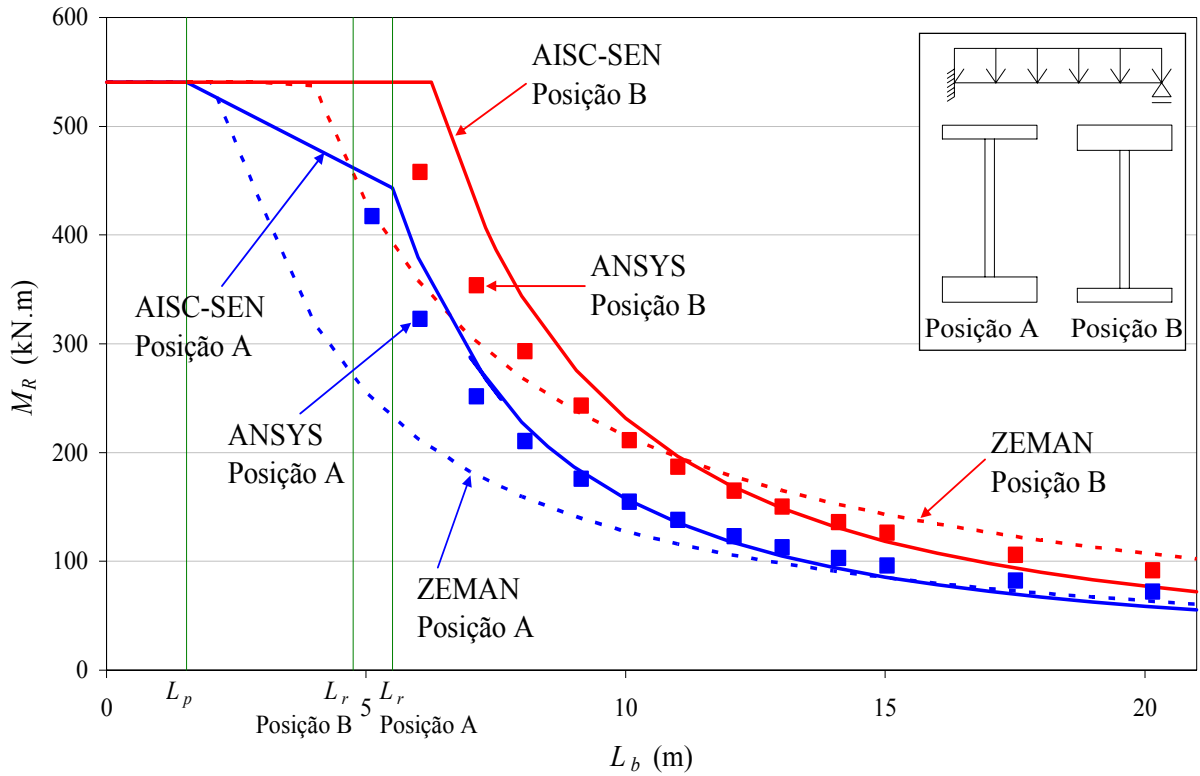


Figura 4.66 – Valores de  $M_R$  para o caso 6 e seção I monossimétrica com cargas desestabilizantes

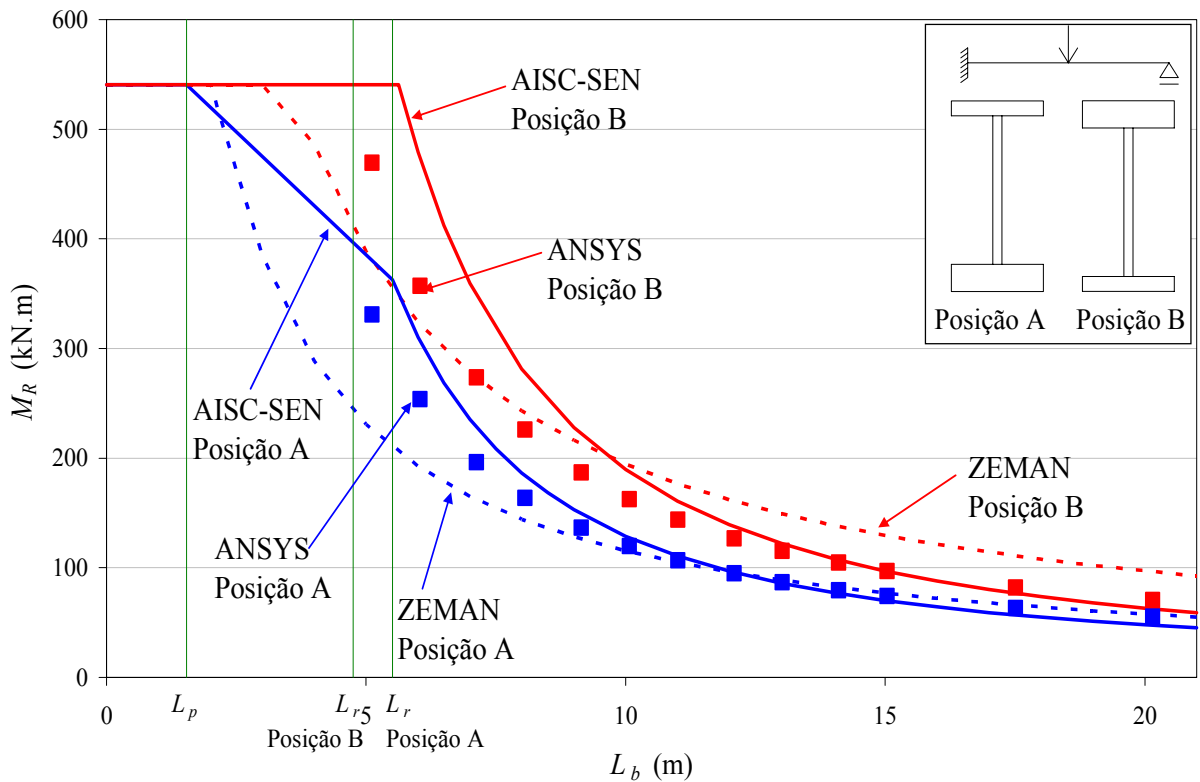


Figura 4.67 – Valores de  $M_R$  para o caso 7 e seção I monossimétrica com cargas desestabilizantes

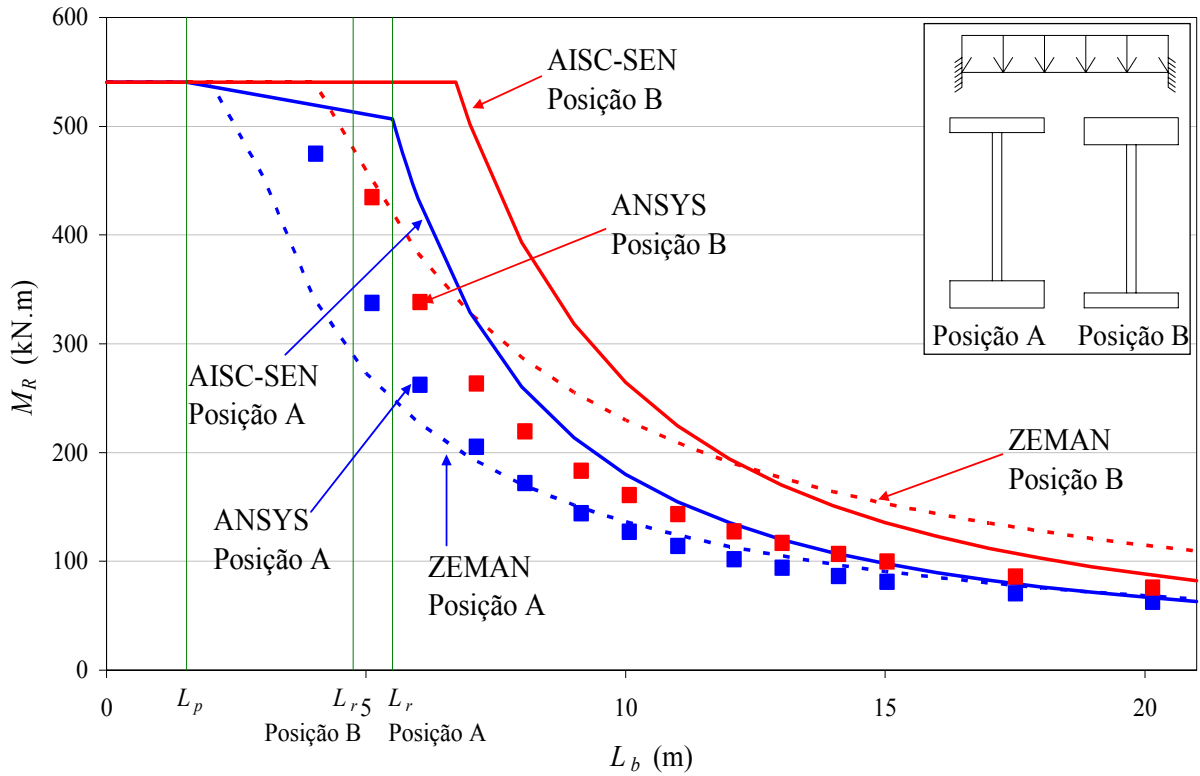


Figura 4.68 – Valores de  $M_R$  para o caso 8 e seção I monossimétrica com cargas desestabilizantes

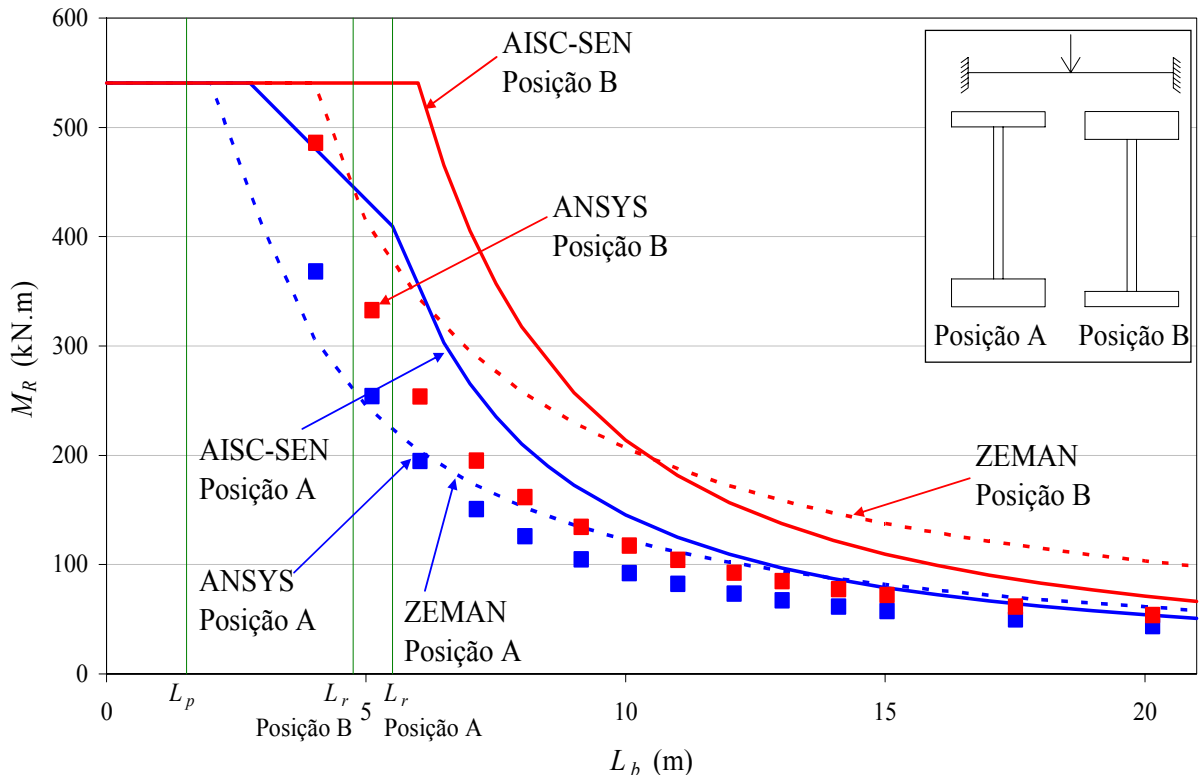


Figura 4.69 – Valores de  $M_R$  para o caso 9 e seção I monossimétrica com cargas desestabilizantes

Nota-se que o procedimento simplificado da Zeman (1999) apresenta sempre momentos resistentes superiores aos do ANSYS 9.0 (2004), levando a resultados contrários à segurança, nos casos 8 e 9, nos maiores comprimentos destravados, e também nos casos 4, 5 e 7 para as duas posições e no caso 6 para a Posição B. Já para os menores comprimentos dos casos 4, 5, 7, e para a Posição A do caso 6, o procedimento da Zeman (1999) apresenta resultados favoráveis à segurança, com momentos resistentes inferiores. Vale ressaltar, porém, que o procedimento da Zeman (1999) não prevê cargas desestabilizantes e para realização deste estudo, o cálculo do coeficiente  $k_c$  é dado pelo inverso da raiz quadrada do coeficiente  $C_b$  dado pela Equação (2.4). Conforme será visto a seguir, o valor  $C_b$  mostra-se impreciso. Além disso, o procedimento da Zeman (1999) recomenda o uso da curva de resistência da DIN 18800 (1990), que fornece algumas distorções nos resultados, conforme visto no sub-item 4.2.1.

Nos casos 4 e 5, o procedimento AISC-SEN apresenta resultados próximos dos obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004). Nos casos 6, 7, 8 e 9, o procedimento mostra-se contrário a segurança, tendo como razão o fato de o valor de  $C_b$ , dado pela Equação (2.4), ser aproximado. Em um estudo adicional foi usado o programa computacional MCE, para explicar a causa destas constatações. Confirmou-se que o problema está no valor do coeficiente  $C_b$ , dado pela Equação (2.4), por ter valor único e fixo para cada caso no procedimento AISC-SEN, sendo que pelo programa MCE o valor varia em função do vão da viga. A Tabela 4.5 apresenta os valores  $C_b$  obtidos usando a Equação (2.4) e pelo programa MCE, para os comprimentos da viga em que a flambagem ocorre no regime elástico delimitado pelo procedimento AISC-SEN.

Tabela 4.5 – Valores de  $C_b$  para viga monossimétrica, cargas desestabilizantes

Valores de $C_b$											
Caso 4				Caso 5				Caso 6			
Equação (2.4)				Equação (2.4)				Equação (2.4)			
0,81				0,94				1,16			
Programa MCE				Programa MCE				Programa MCE			
Posição A		Posição B		Posição A		Posição B		Posição A		Posição B	
$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$
4,030	-	4,030	-	4,030	-	4,030	-	4,030	-	4,030	-
5,115	0,76	5,115	0,72	5,115	-	5,115	-	5,115	1,11	5,115	-
6,045	0,76	6,045	0,73	6,045	0,85	6,045	0,80	6,045	1,13	6,045	1,53
7,130	0,77	7,130	0,74	7,130	0,86	7,130	0,81	7,130	1,14	7,130	1,55
8,060	0,78	8,060	0,75	8,060	0,87	8,060	0,82	8,060	1,16	8,060	1,56
9,145	0,79	9,145	0,76	9,145	0,88	9,145	0,84	9,145	1,18	9,145	1,58
10,075	0,79	10,075	0,77	10,075	0,89	10,075	0,85	10,075	1,19	10,075	1,59
11,005	0,80	11,005	0,78	11,005	0,90	11,005	0,86	11,005	1,21	11,005	1,61
12,090	0,81	12,090	0,79	12,090	0,91	12,090	0,87	12,090	1,23	12,090	1,63
13,020	0,82	13,020	0,80	13,020	0,92	13,020	0,89	13,020	1,25	13,020	1,64
14,105	0,83	14,105	0,81	14,105	0,93	14,105	0,90	14,105	1,27	14,105	1,66
15,035	0,83	15,035	0,82	15,035	0,94	15,035	0,91	15,035	1,29	15,035	1,67
17,515	0,85	17,515	0,84	17,515	0,96	17,515	0,94	17,515	1,34	17,515	1,71
20,150	0,87	20,150	0,86	20,150	0,98	20,150	0,97	20,150	1,39	20,150	1,75
Caso 7				Caso 8				Caso 9			
Equação (2.4)				Equação (2.4)				Equação (2.4)			
0,95				1,32				1,07			
Programa MCE				Programa MCE				Programa MCE			
Posição A		Posição B		Posição A		Posição B		Posição A		Posição B	
$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$	$L_b$ (m)	$C_b$
4,030	-	4,030	-	4,030	-	4,030	-	4,030	0,63	4,030	-
5,115	0,85	5,115	1,15	5,115	0,89	5,115	1,10	5,115	0,64	5,115	0,80
6,045	0,86	6,045	1,16	6,045	0,90	6,045	1,11	6,045	0,65	6,045	0,81
7,130	0,87	7,130	1,17	7,130	0,92	7,130	1,13	7,130	0,66	7,130	0,82
8,060	0,88	8,060	1,18	8,060	0,93	8,060	1,15	8,060	0,67	8,060	0,84
9,145	0,90	9,145	1,20	9,145	0,95	9,145	1,17	9,145	0,68	9,145	0,85
10,075	0,91	10,075	1,21	10,075	0,97	10,075	1,19	10,075	0,69	10,075	0,86
11,005	0,92	11,005	1,22	11,005	0,99	11,005	1,21	11,005	0,70	11,005	0,88
12,090	0,94	12,090	1,24	12,090	1,01	12,090	1,24	12,090	0,72	12,090	0,89
13,020	0,95	13,020	1,25	13,020	1,03	13,020	1,26	13,020	0,73	13,020	0,91
14,105	0,97	14,105	1,26	14,105	1,06	14,105	1,28	14,105	0,74	14,105	0,92
15,035	0,98	15,035	1,28	15,035	1,08	15,035	1,30	15,035	0,76	15,035	0,94
17,515	1,02	17,515	1,31	17,515	1,13	17,515	1,36	17,515	0,79	17,515	0,98
20,150	1,06	20,150	1,34	20,150	1,19	20,150	1,43	20,150	0,83	20,150	1,01

As Figuras 4.70 a 4.75 apresentam, respectivamente para os casos 4 a 9, comparações entre os resultados obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004) com o procedimento AISC-SEN (apenas no regime elástico), usando o coeficiente  $C_b$  fornecido pelo programa MCE.

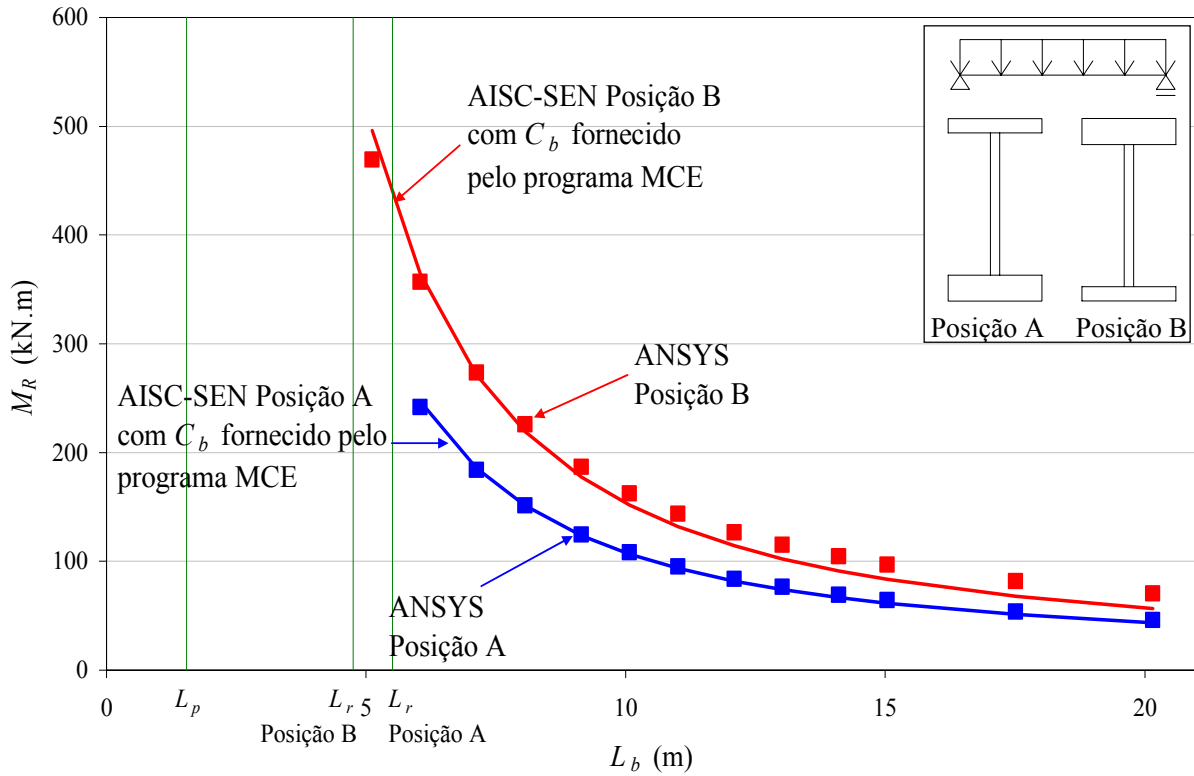


Figura 4.70 – Comparação do caso 4 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes

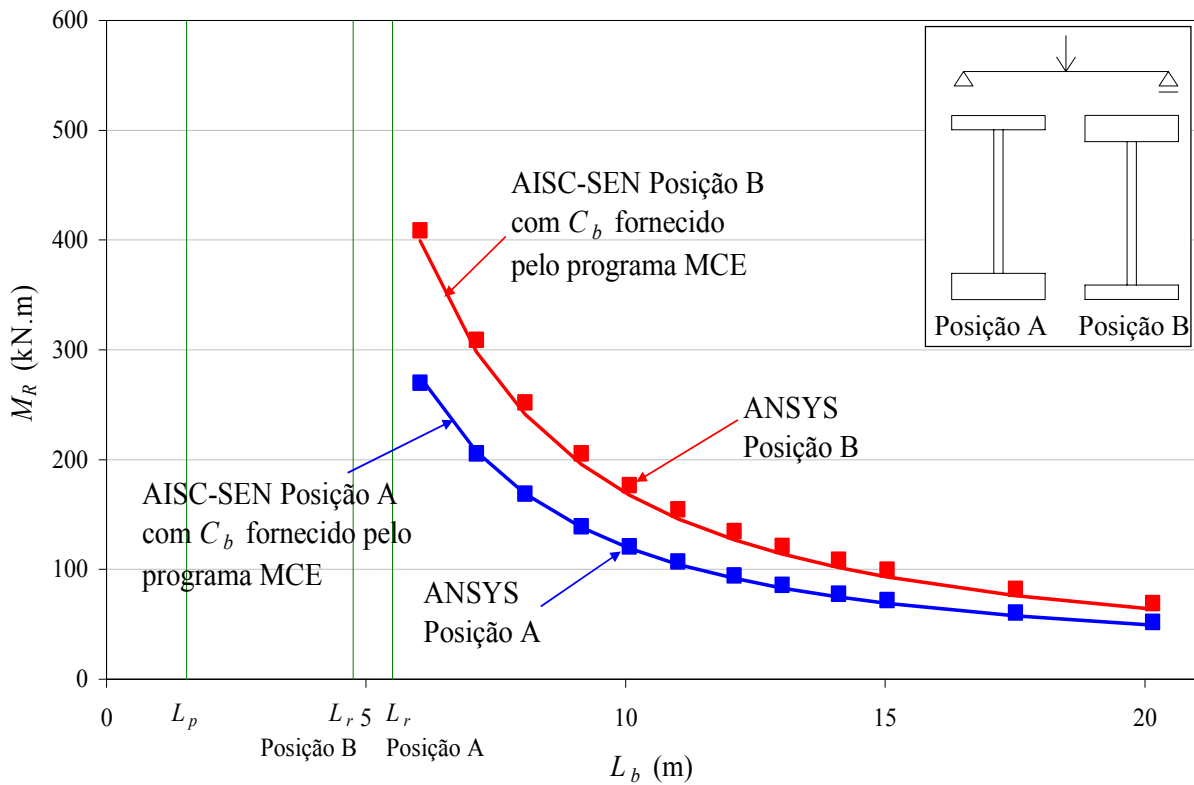


Figura 4.71 – Comparação do caso 5 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes



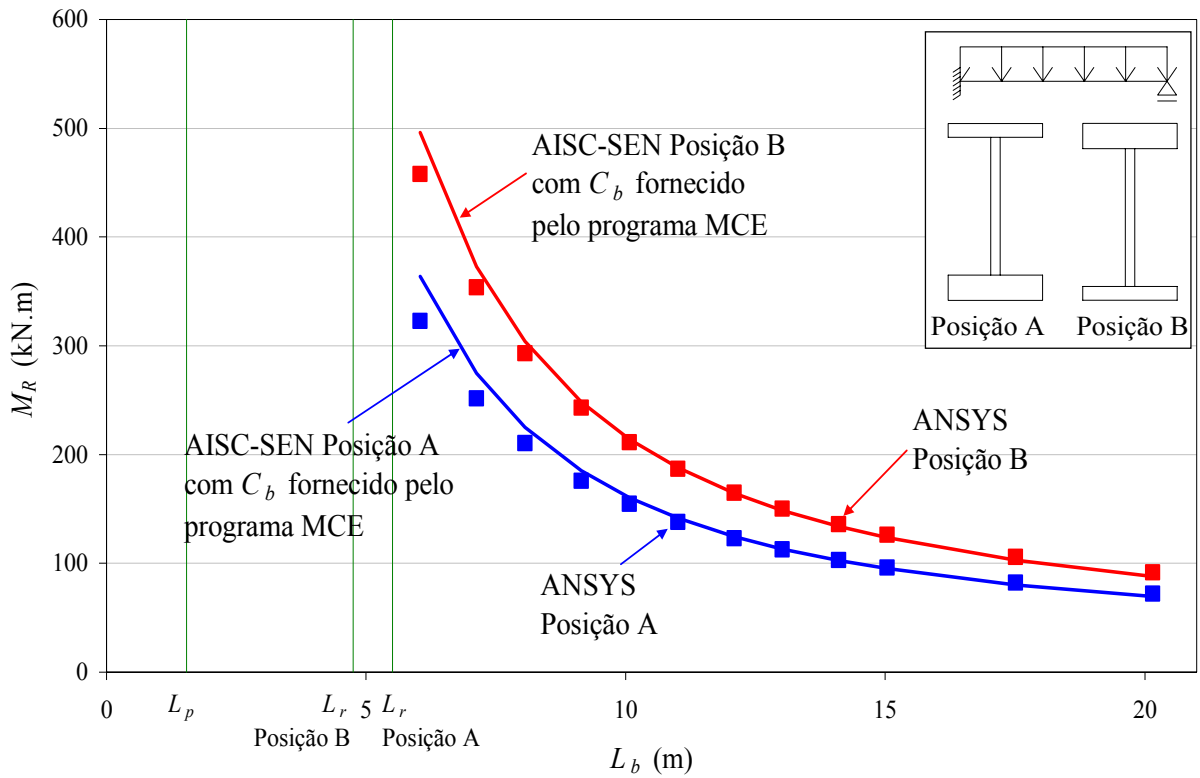


Figura 4.72 – Comparação do caso 6 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes

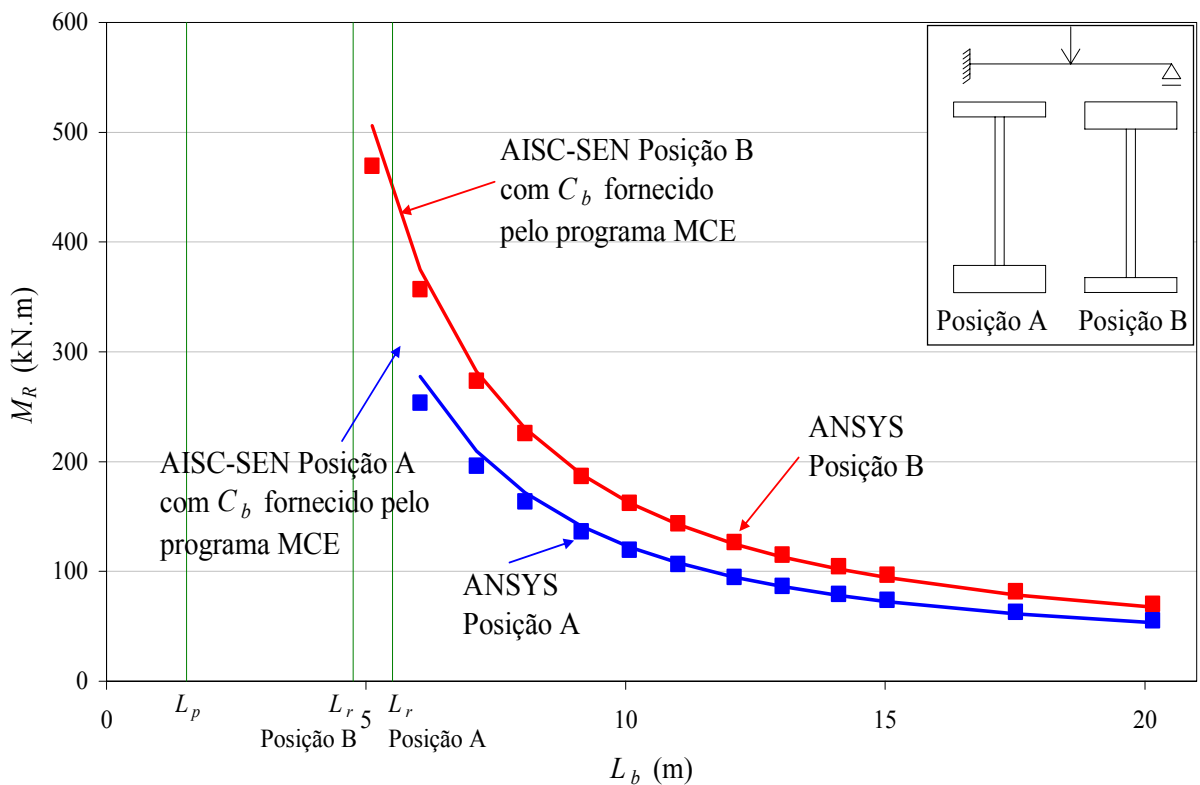


Figura 4.73 – Comparação do caso 7 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes

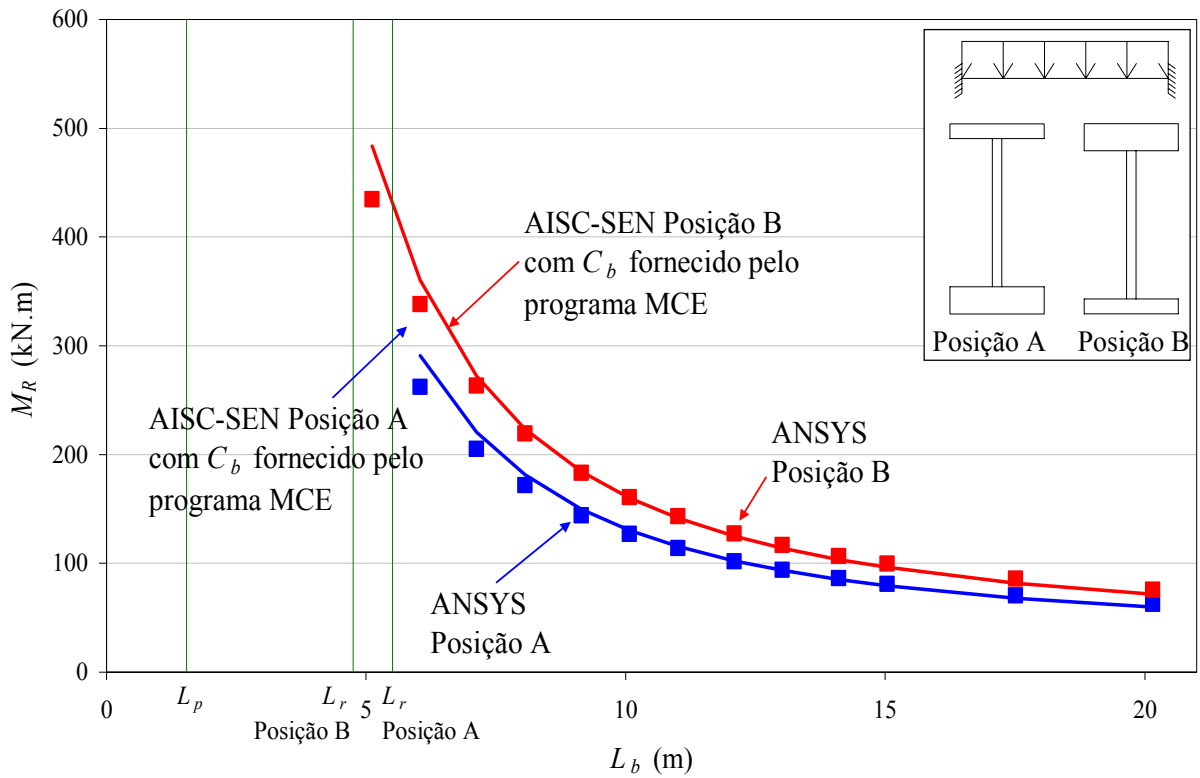


Figura 4.74 – Comparação do caso 8 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes

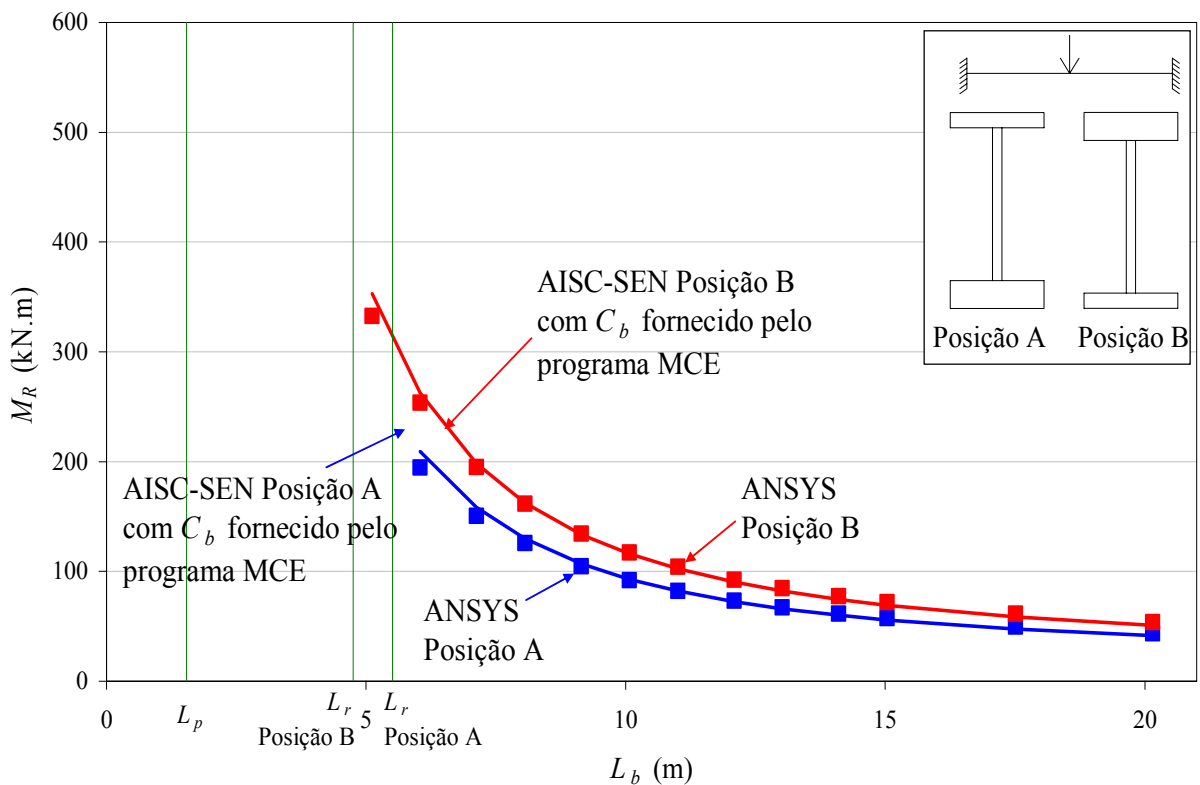


Figura 4.75 – Comparação do caso 9 entre o procedimento AISC-SEN usando  $C_b$  dado pelo programa MCE com ANSYS 9.0 (2004) com cargas desestabilizantes

Com os valores de  $C_b$  fornecidos pelo programa MCE, o procedimento AISC-SEN apresenta resultados próximos aos valores de momentos resistentes obtidos numericamente pelo programa ANSYS 9.0 (2004), mostrando-se um procedimento confiável.

Observa-se também, para as cargas desestabilizantes, que se o vão diminui, a relação entre os momentos resistentes obtidos pelo programa ANSYS 9.0 (2004) e pelo AISC-SEN também se reduz, em decorrência deste não considerar o efeito da distorção da alma na flambagem (Ma & Hughes 1996, Hughes & Ma 1996 e Samanta & Kumar, 2005) e a alma nas propriedades geométricas da seção transversal.

#### 4.4. Outras Seções Transversais

Para mostrar que os resultados desse trabalho podem ser estendidos às demais seções transversais (lembra-se que somente foi processado seção transversal com altura da alma de 800 mm), foi efetuado um estudo complementar simplificado para obtenção do momento crítico elástico em vigas com altura de 400 mm e 1200 mm, respectivamente os limites inferior e superior utilizados no Brasil, na fabricação das vigas de alma senoidal.

As vigas com altura de alma de 400 mm podem ter seção transversal duplamente simétrica ou monossimétrica. Na duplamente simétrica, as mesas apresentam largura de 150 mm e espessura de 8 mm e a alma senoidal espessura de 2 mm (Figura 4.76.a). Na monossimétrica, apenas aumentou-se a espessura de uma das mesas para 16 mm (Figura 4.76.b).

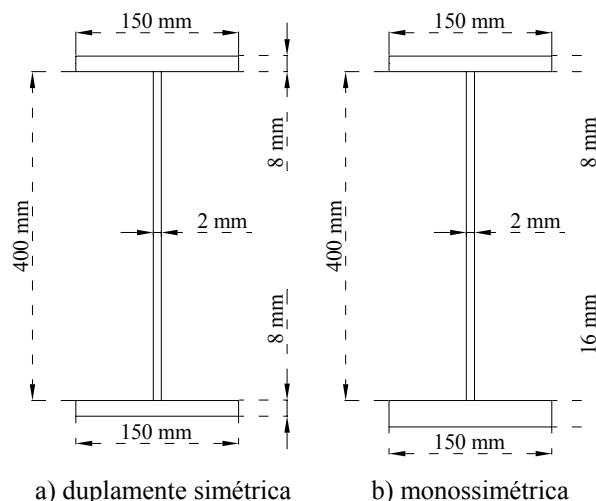


Figura 4.76 – Dimensões das vigas com altura de alma de 400 mm

As vigas com altura de alma de 1200 mm, da mesma forma, podem ter seções duplamente simétrica e monossimétrica. No primeiro caso, as mesas possuem largura de 250 mm e espessura de 12,5 mm e a alma espessura de 2 mm (Figura 4.77.a). No segundo caso, somente elevou-se a espessura de uma das mesas para 19 mm (Figura 4.77.b).

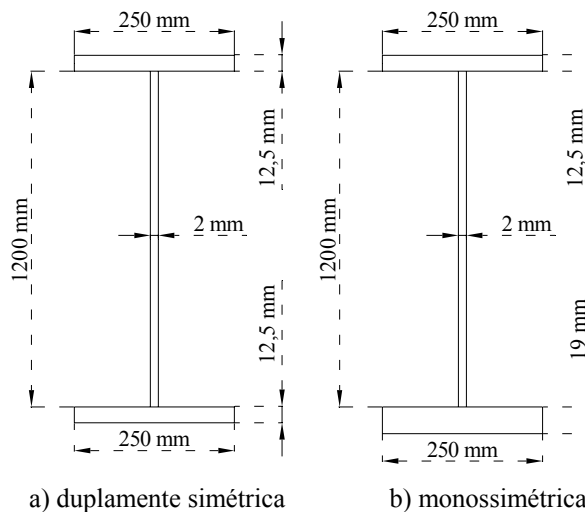


Figura 4.77 – Dimensões das vigas com altura de alma de 1200 mm

Como foi feito sempre ao longo desse trabalho, as vigas foram consideradas com eixo reto, mas foi tomado apenas um vão, com comprimento de 10,075 m. Além disso, considerou-se somente carga transversal aplicada na meia-altura da seção transversal e o caso 4 de carregamento, indicado na Figura 3.2. Nas vigas de seção I monossimétrica a seção transversal foi disposta em duas posições distintas, A e B, conforme explicado no sub-item 3.4.

As Tabelas 4.6 e 4.7 mostram, respectivamente para as vigas de 400 mm e 1200 mm, os valores do momento crítico elástico,  $M_R$ , obtidos numericamente pelo programa ANSYS 9.0 (2004), pelo procedimento recomendado pela Zeman (1999) e pelo procedimento AISC-SEN, proposto neste trabalho, neste ultimo, foram adotados valores de  $C_b$  dado pela Equação (2.4) e também por Reis (1996) usando o programa MCE.

Tabela 4.6 – Valores de  $M_R$  para as vigas com altura de alma de 400 mm

Caso 4				
Seção Transversal	ANSYS (kN.m)	AISC-SEN (kN.m)		Zeman (kN.m) $k_c = 0,94$
		Equação (2.4)	Reis (1996)	
Duplamente Simétrica	32,98	$C_b = 1,14$	$C_b = 1,14$	29,79
		30,01	30,01	
Monossimétrica Posição A	58,25	$C_b = 1,14$	$C_b = 1,21$	30,08
		54,81	58,51	
Monossimétrica Posição B	69,13	$C_b = 1,14$	$C_b = 1,05$	60,15
		73,71	67,97	

Tabela 4.7 – Valores de  $M_R$  para as vigas com altura de alma de 1200 mm

Caso 4				
Seção Transversal	ANSYS (kN.m)	AISC-SEN (kN.m)		Zeman (kN.m) $k_c = 0,94$
		Equação (2.4)	Reis (1996)	
Duplamente Simétrica	462,73	$C_b = 1,14$	$C_b = 1,14$	384,18
		470,46	470,46	
Monossimétrica Posição A	491,22	$C_b = 1,14$	$C_b = 1,24$	385,21
		459,25	499,72	
Monossimétrica Posição B	714,31	$C_b = 1,14$	$C_b = 1,03$	585,52
		798,09	726,69	

Observa-se que os resultados relativos entre os procedimentos ficaram próximos dos obtidos anteriormente com a viga de altura da alma de 800 mm. Nota-se claramente no entanto, como era de se esperar, uma maior influência da distorção da alma na viga de maior altura.

## 5. CONCLUSÕES

### 5.1. Considerações Gerais

Neste trabalho foram determinados pelo método dos elementos finitos, via programa ANSYS 9.0 (2004), os valores do momento crítico elástico para o estado limite de flambagem lateral com torção de duas vigas de alma senoidal com altura de alma de 800 mm, uma com seção I duplamente simétrica e outra com seção I monossimétrica, submetidas a alguns casos representativos de carregamento, variando-se o comprimento destravado. Nos casos de carregamento em que atuam cargas transversais, estas foram aplicadas em três níveis distintos, na semi-distância entre os centros geométricos das mesas superior e inferior, na face da mesa inferior (cargas estabilizantes) e na face da mesa superior (cargas desestabilizantes). Na viga de seção monossimétrica, a seção transversal foi considerada em duas posições distintas. Na primeira posição, a mesa de maior espessura foi disposta como mesa inferior. Na segunda posição, a mesa de menor espessura que foi posicionada como mesa inferior. Para generalização das conclusões a outras seções transversais, foram também processadas vigas com seções I duplamente simétrica e monossimétrica de 400 mm e 1200 mm de altura da alma, respectivamente as alturas mínima e máxima previstas pelo fabricante brasileiro de peças de alma senoidal (ver sub-item 1.5).

Admitidos como corretos, os resultados do ANSYS 9.0 (2004) foram comparados com os obtidos pelo procedimento de projeto da norma americana ANSI/AISC 360-05 (2005) para vigas de alma plana, adaptado neste trabalho para as vigas de alma senoidal, em um procedimento que foi aqui denominado AISC-SEN, e com um procedimento simplificado, recomendado pela Zeman (1999), fabricante europeu, que considera apenas a resistência da mesa comprimida. A rigor, o procedimento AISC-SEN segue a mesma formulação do ANSI/AISC 360-05 (2005), apenas não considera a alma da viga, assume uma tensão residual máxima de compressão nas mesas de 70 MPa, típica dos perfis soldados produzidos com chapas cortadas a maçarico, e leva em consideração o nível de aplicação das cargas transversais. Além disso foi realizado um estudo adicional, usando o programa computacional MCE, desenvolvido na UFMG por Reis (1996), para a obtenção de valores mais precisos de  $C_b$ , usados no procedimento AISC-SEN para efeito de comparação.

## 5.2. Viga com Seção I Duplamente Simétrica

### 5.2.1. *Momentos e Cargas Transversais Aplicadas na Meia-Altura da Seção Transversal*

Na comparação dos valores do ANSYS 9.0 (2004) com o procedimento simplificado da Zeman (1999), conclui-se que este último é bastante impreciso, apresentando, nos casos estudados, momentos resistentes erroneamente elevados para os maiores comprimentos destravados, e erroneamente reduzidos para os menores comprimentos.

Os valores obtidos pelo procedimento AISC-SEN ficaram muito próximos dos do ANSYS 9.0 (2004) na maioria dos casos, ou se mostraram, em alguns casos de carregamento, um pouco conservadores em virtude de imprecisão no valor adotado para o coeficiente  $C_b$ .

Em pequenos comprimentos destravados, o procedimento AISC-SEN apresenta valores ligeiramente superiores ao ANSYS 9.0 (2004), pelo fato de não considerar o efeito da distorção da alma na flambagem (Ma & Hughes 1996, Hughes & Ma 1996 e Samanta & Kumar 2005). Deve-se salientar, no entanto, que em termos práticos, a distorção, que também ocorre nas vigas de alma plana, não costuma ser considerada nas normas de projetos, pois quando a mesma se torna significativa, a instabilidade não mais ocorre em regime elástico. A desconsideração da alma nas propriedades geométricas da seção transversal, especialmente no que se refere ao momento de inércia à torção, também contribui para tornar menor a razão entre os resultados obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004) e pelo AISC-SEN nos vãos menores. Nos vãos maiores, o momento de inércia à torção influi mais nos resultados, elevando o momento resistente, o que é devidamente captado pelo programa ANSYS 9.0 (2004). Contudo, com valores de  $C_b$  mais precisos, como os de Reis (1996), conclui-se que o procedimento AISC-SEN pode ser empregado para determinação do momento resistente de flambagem lateral com torção de vigas de seção I duplamente simétrica nos casos de carregamentos que atuam momentos e cargas transversais na meia-altura da seção transversal, de forma segura e sem contrariar significativamente a economia.

### **5.2.2. Cargas Transversais Aplicadas na Face Inferior (Estabilizantes)**

O procedimento simplificado da Zeman (1999), na comparação com os valores do ANSYS 9.0 (2004), mostra-se impreciso, apresentando momentos resistentes demasiadamente favoráveis à segurança, nos casos de carregamentos estudados, em virtude do procedimento não prever cargas estabilizantes no cálculo do fator  $k_c$ . Isto ocorreu mesmo tendo sido usado para  $k_c$  sua definição, ou seja, o inverso da raiz quadrada do valor de  $C_b$ , calculado para cargas estabilizantes.

Devido à imprecisão no valor adotado para o coeficiente  $C_b$ , os valores obtidos pelo procedimento AISC-SEN mostraram-se conservadores em relação aos obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004), para as vigas estudadas. Porém um estudo adicional, usando valores mais precisos de  $C_b$ , obtidos de Reis (1996), mostraram que o procedimento AISC-SEN pode ser empregado, com aceitável segurança e economia, na determinação do momento resistente de flambagem lateral com torção de vigas de seção I duplamente simétrica de alma senoidal com ação de cargas estabilizantes.

### **5.2.3. Cargas Transversais Aplicadas na Face Superior (Desestabilizantes)**

Comparando os valores obtidos numericamente pelo programa computacional ANSYS 9.0 (2004) com o procedimento simplificado da Zeman (1999), conclui-se que este último é impreciso, apresentando momentos resistentes expressivamente contrários à economia, nos casos de carregamentos estudados, em virtude do procedimento não prever cargas desestabilizantes no cálculo do fator  $k_c$ .

Na comparação dos valores obtidos pelo procedimento AISC-SEN com os obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004), devido à imprecisão no valor adotado para o coeficiente  $C_b$ , os primeiros mostraram-se desfavoráveis à segurança, para as vigas estudadas. Entretanto, usando valores de  $C_b$  mais precisos, obtidos conforme Reis (1996), conclui-se que o procedimento AISC-SEN é eficiente na determinação do momento resistente de flambagem lateral com torção de vigas de seção I duplamente simétrica de alma senoidal com ação de cargas desestabilizantes, atendendo aos requisitos de segurança e economia.



### **5.3. Viga com Seção I Monossimétrica**

#### **5.3.1. Momentos e Cargas Transversais Aplicadas na Meia-Altura da Seção Transversal**

Similarmente para a viga de seção I duplamente simétrica, conclui-se que o procedimento simplificado da Zeman (1999), na comparação com os valores do ANSYS 9.0 (2004), é bastante impreciso apresentando, em alguns casos estudados, momentos resistentes erroneamente elevados para os maiores comprimentos destravados e erroneamente reduzidos para os menores comprimentos. Em outros casos, os momentos resistentes mantiveram-se equivocadamente reduzidos para toda a faixa de comprimentos destravados estudada.

Os valores obtidos pelo procedimento AISC-SEN ficaram muito próximos dos do ANSYS 9.0 (2004), ou se mostraram um pouco conservadores em virtude de imprecisão no valor adotado para o coeficiente  $C_b$ , para as vigas estudadas. Assim, conclui-se que, também similarmente à viga de seção I duplamente simétrica, o procedimento AISC-SEN pode ser empregado para determinação do momento resistente de flambagem lateral com torção de vigas de seção I monossimétrica de alma senoidal nos casos de carregamentos em que atuam momentos e cargas transversais na meia-altura da seção transversal, de forma segura e sem contrariar expressivamente a economia.

#### **5.3.2. Cargas Transversais Aplicadas na Face Inferior (Estabilizantes)**

O procedimento simplificado da Zeman (1999), semelhante à viga de seção I duplamente simétrica, na comparação com os valores do ANSYS 9.0 (2004), mostra-se impreciso, gerando momentos resistentes excessivamente favoráveis à segurança, nos casos de carregamentos estudados, em virtude do procedimento não prever cargas estabilizantes no cálculo do fator  $k_c$ .

Os valores obtidos pelo procedimento AISC-SEN, quando relacionado com os obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004), mostraram-se conservadores, para as vigas estudadas, devido à imprecisão no valor adotado para o coeficiente  $C_b$ . No entanto, com um estudo adicional, usando um valor mais preciso de  $C_b$ , conclui-se que, também de forma semelhante à viga de

seção I duplamente simétrica, é adequado o uso do procedimento AISC-SEN na determinação do momento resistente de flambagem lateral com torção de vigas de seção I monossimétrica de alma senoidal com ação de cargas estabilizantes.

### **5.3.3. Cargas Transversais Aplicadas na Face Superior (Desestabilizantes)**

Efetuada a comparação dos valores obtidos numericamente pelo programa computacional ANSYS 9.0 (2004) com o procedimento simplificado da Zeman (1999), conclui-se que, igualmente à viga de seção I duplamente simétrica, este último é muito impreciso, apresentando, em alguns casos estudados, momentos resistentes erroneamente elevados para os maiores comprimentos destravados e erroneamente reduzidos para os menores comprimentos. Em outros casos, apresenta momentos resistentes contrários à segurança para todos os comprimentos destravados.

Os valores obtidos pelo procedimento AISC-SEN quando comparados com os obtidos pelo ANSYS 9.0 (2004), na maioria dos casos estudados, mostraram-se contrários à segurança, devido à imprecisão no valor adotado para o coeficiente  $C_b$ . Entretanto, usando valores de  $C_b$  mais precisos, obtidos de Reis (1996), conclui-se que, também igualmente à viga de seção I duplamente simétrica, o procedimento AISC-SEN fornece valores do momento resistente de flambagem lateral com torção de vigas de seção I monossimétrica de alma senoidal com cargas desestabilizantes com precisão aceitável.

## **5.4. Análise Final e Sugestões**

Levando-se em conta o objetivo inicial deste estudo, que foi a proposição de um método confiável para a obtenção da resistência da flambagem lateral com torção das vigas de alma senoidal, considerando diversas situações de carregamentos e condições de contorno, torna-se possível agora fazer uma análise final do trabalho realizado.

O procedimento AISC-SEN pode ser empregado para determinação do momento resistente de flambagem lateral com torção de vigas de seções I duplamente simétrica e monossimétrica de alma senoidal, inclusive com cargas transversais estabilizantes e desestabilizantes. As análises

numéricas ficaram restritas ao regime elástico delimitado pelo procedimento AISC-SEN. Apesar disso, acredita-se ser possível recomendar a adoção deste procedimento também para o colapso fora desse regime. Isto porque a faixa atingida pelo regime elástico alcançou momentos resistentes com valores muito elevados, próximos do limite superior de resistência, que é o momento de plastificação da seção transversal. Entre o máximo momento em regime elástico e o momento de plastificação, o comportamento pode ser aproximado por uma reta de transição, como é usual.

No entanto, o uso do procedimento AISC-SEN deve ser feito com o emprego do valor correto do coeficiente  $C_b$ . Em vários casos, o valor fornecido pela Equação (2.4), que é bastante simplificada, conduz a bons resultados. Mas, nos seguintes casos, não, podendo inclusive levar a resultados contrários à segurança:

- na viga com seção duplamente simétrica caso 9 com cargas transversais na meia-altura da seção transversal e casos 4 a 9 quando há ação de cargas desestabilizantes;
- na viga com seção monossimétrica casos 4 a 9 quando há ação de cargas desestabilizantes.

Constatou-se também que alguns itens relacionados às vigas de alma senoidal necessitam de um estudo mais aprofundado, os quais serão apresentados apenas como sugestão para pesquisas posteriores. Além disso, há assuntos correlatos para os quais seria importante um desenvolvimento semelhante ao que foi apresentado aqui. Assim sendo, sugere-se:

- o estudo do comportamento à flambagem lateral com torção no regime inelástico;
- o estudo de vigas em balanço;
- o estudo de outros estados limites últimos para vigas de alma senoidal, como a flambagem local da mesa comprimida e a flambagem da alma por força cortante e a flambagem da alma causada por forças localizadas;
- o estudo da distorção da alma na flambagem lateral com torção;

- o estudo de uma expressão mais precisa do coeficiente  $R_a$ , que leva em conta a atuação de cargas transversais em nível distinto da semi-altura da seção transversal.
- o desenvolvimento de um programa computacional para o dimensionamento que, inclusive, utilize um fator de momento equivalente mais preciso no estado limite de flambagem lateral com torção.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABAQUS (V5.2), Hibbitt, Karlson & Sorensen, Inc., Pawtucket, R.I., 1992.

AMERICAN NATIONAL STANDARD ANSI/AISC 360-05, Specification for Structural Steel Building. AISC, Chicago, Illinois, USA2005.

ANSYS, Finite element program users, Versão 9.0, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), Projeto e execução de estruturas de aço e de estruturas mistas aço-concreto de edifícios – Texto-base de Revisão da NBR 8800, Dezembro, 2005.

BRITISH STANDARDS INSTITUTION (BSI), Structural use of steelwork in building- Part1: Code of practice for design- Rolled and welded sections, BS 5950-1:2000, Mar 2001.

CASTRO E SILVA, A.L.R.; FAKURY, R.H. & RODRIGUES, F.C., Análise da Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço. In IV Simpósio Mineiro de Mecânica Computacional, pp. 234-241, Uberlândia, Brasil, 2000.

CALENZANI A. F. G., FAKURY R.H. e de PAULA F. A., Determinação do carregamento crítico de vigas celulares de aço para a flambagem lateral com torção, Revista de Engenharia Ciência e Tecnologia, 2005.

CODEME ENGENHARIA S.A., Perfis de alma senoidal, versão 1.0, Brasil, 2005.

CHEN W. F. and LUI E. M., Structural Stability: Theory and Implementation. Elsevier Science, New York, 1987.

DAST-Richtlinie 015, Träger mit Schlanken Stegen, Germany, 1990.

DIN 18800, Teil 2: Stahlbauten. Stabilitätsfälle, Knicken von Stäben und Stabwerken Stability, buckling of bars and skeletal structures, Entwurf, März 1988.

de HOOP H. G., Literature Study, Master Thesis: Girders with corrugated webs, Iv-Bouw & Industrie, Technische Universiteit Delft, Netherlands, 2003-a.

de HOOP H. G.-b, Explorative Analysis, Master Thesis: Girders with corrugated webs, Iv-Bouw & Industrie, Technische Universiteit Delft, Netherlands, 2003-b.

ELGAALY M., SESHADRI A. and HAMILTON R. W., Bending strength of steel beams with corrugated webs, Journal of Structural Engineering, ASCE, Junho 1997, 123, No. 6, pg 772–782.

ELGAALY, M. and SESHADRI A., Girders with Corrugated webs Under Partial Compressive Edge Loading, Journal of Structural Engineering, ASCE, Junho 1997, 123, No 6, pg 783-791.

ELGAALY M., HAMILTON R. W. and SESHADRI A., Shear strength of beams with corrugated webs. Journal of Structural Engineering, ASCE, abril 1996, 122, No. 4, pg 390–398.

EUROCODE 3: DESIGN OF STEEL STRUCTURES, European Committee for Standardization - Bruxelas, 2003.

FAKURY, R.H.; HACKBARTH JUNIOR, H.; CALENZANI, F.A.G.; QUEIROZ, G. & PIMENTA, R.J., Determinação do momento fletor resistente de vigas de aço de alma senoidal à flambagem lateral com torção. In: *CILAMCE 2005*, pp. 1-14. Guarapari, Espírito Santo, Brasil, 2005.

FAKURY, R.H.; HACKBARTH JUNIOR, H.; CALENZANI, F.A.G.; QUEIROZ, G. & PIMENTA, R.J., Determinação do momento fletor resistente de vigas de aço de alma senoidal à flambagem lateral com torção. III Congresso Internacional da Construção Metálica – III CICOM, Ouro Preto, Brasil, 2006 a ser publicado.

FAKURY, R.H.; HACKBARTH JUNIOR, H.; CALENZANI, F.A.G.; QUEIROZ, G. & PIMENTA, R.J., Sobre o do momento fletor resistente de vigas de aço de alma senoidal com seção I monossimétrica à flambagem lateral com torção. In: XXXVII Jornadas Sudamericanas de Ingeniería Estructural, pp. 1-10. Campinas, São Paulo, Brasil, 2006 a ser publicado.

FAKURY, R.H.; RODRIGUES, F.C. & CASTRO E SILVA, A.L.R.C., Análise Teórico-Experimental da Flambagem Lateral com Torção de Vigas Eletrossoldadas. In: XXIV Congresso Ibero Latino Americano sobre Métodos Computacionais para Engenharia, pp. 1-15, Ouro Preto, Brasil, 2003.

GLP, Corrugated Plate Industry, disponível em <http://www.cpi-glp.com/>, acesso em 08/03/2005.

HELWIG A., FRANK K. H. and YURA J. A., Lateral-torsional buckling of singly symmetric I-beams, *Journal of Structural Engineering*, ASCE, 1997.

HUGHES, O & MA, M., Lateral-distortional buckling of monosymmetric beams under point load, *J Struct Mech, ASCE*, Vol 122(10): 1022-1029, 1996.

KIRBY, P.A. and NETHERCOT, D.A., *Design for structural stability*, John Wley & Lons Inc., Ney York, 1979.

LINDNER J., Lateral-Torsional buckling of beams with trapezoidally corrugated webs, *Proceedings of the 4th International Colloquium on Stability of Steel Structures*, Budapest, Hungary, 1990.

MA, M. & HUGHES, O., Lateral-distortional buckling of monosymmetric I-beams under distributed vertical load, *Thin-Walled Structures*, 26(2): 123-145, 1996.

NETHERCOT, D.A., and ROCKEY, K.C., A unified approach to the elastic lateral buckling of beams, *The Structural Engineer*, vol 49, No 7, July, 1971, pag 321-330.

RADHUBER CONSULTING, disponível em <http://www.radhuber.com/>, acesso em 15/3/2005.

REIS A. L. F., O Método da Energia aplicado à Flambagem Lateral com Torção de Vigas de Aço, Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Estruturas, Dissertação de Mestrado, UFMG, 1996.

SAYED-AHMED E. Y., Behaviour of steel and (or) composite girders with corrugated steel webs, Canadian Journal of Civil Engineering, 2001, 28, No. 4, pg 656–672.

SAYED-AHMED E. Y., Lateral torsion-flexure buckling of corrugated web steel girders, Structures & Buildings, 158, Fevereiro 2004, pg 53-69.

SAMANTA, A. & KUMAR, A., Distortional buckling in monosymmetric I-beams, Thin-Walled Structures, pp. 1-6 (article in press), 2005.

THAHAIR, N. S., Flexural-torsional buckling of structures, E&FN Spon, London, 1993.

TIMOSHENKO, S.P. and GERE, J.M., Theory of elastic stability, 2<sup>nd</sup> ed., McGraw-Hill Book Co., Inc., New York, N.Y., 1961.

WANG, X., Behavior of Steel members with Trapezoidally Corrugated Webs and Tubular Flanges under Static Loading, Drexel University, Doctor Thesis 2003.

ZEMAN & CO GESELLSCHAFT MBH, Corrugated Web Beam, Technical Document, Maio 1999.



## ANEXO DE TABELAS

Tabela 1 – Caso 1, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura.....	101
Tabela 2 – Caso 2, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura.....	102
Tabela 3 – Caso 3, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura.....	102
Tabela 4 – Caso 4, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura.....	103
Tabela 5 – Caso 5, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura.....	103
Tabela 6 – Caso 6, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura.....	104
Tabela 7 – Caso 7, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura.....	104
Tabela 8 – Caso 8, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura.....	105
Tabela 9 – Caso 9, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura.....	105
Tabela 10 – Caso 4, viga de seção duplamente simétrica com cargas estabilizantes.....	106
Tabela 11 – Caso 5, viga de seção duplamente simétrica com cargas estabilizantes.....	106
Tabela 12 – Caso 6, viga de seção duplamente simétrica com cargas estabilizantes.....	107
Tabela 13 – Caso 7, viga de seção duplamente simétrica com cargas estabilizantes.....	107
Tabela 14 – Caso 8, viga de seção duplamente simétrica com cargas estabilizantes.....	108
Tabela 15 – Caso 9, viga de seção duplamente simétrica com cargas estabilizantes.....	108
Tabela 16 – Caso 4, viga de seção duplamente simétrica com cargas desestabilizantes .....	109
Tabela 17 – Caso 5, viga de seção duplamente simétrica com cargas desestabilizantes .....	109
Tabela 18 – Caso 6, viga de seção duplamente simétrica com cargas desestabilizantes .....	110
Tabela 19 – Caso 7, viga de seção duplamente simétrica com cargas desestabilizantes .....	110
Tabela 20 – Caso 8, viga de seção duplamente simétrica com cargas desestabilizantes .....	111
Tabela 21 – Caso 9, viga de seção duplamente simétrica com cargas desestabilizantes .....	111

Tabela 22 – Caso 1 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	112
Tabela 23 – Caso 1 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	112
Tabela 24 – Caso 2 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	113
Tabela 25 – Caso 2 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	113
Tabela 26 – Caso 3, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	114
Tabela 27 – Caso 4 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	114
Tabela 28 – Caso 4 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	115
Tabela 29 – Caso 5 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	115
Tabela 30 – Caso 5 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	116
Tabela 31 – Caso 6 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	116
Tabela 32 – Caso 6 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	117
Tabela 33 – Caso 7 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	117
Tabela 34 – Caso 7 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	118
Tabela 35 – Caso 8 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	118
Tabela 36 – Caso 8 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	119
Tabela 37 – Caso 9 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	119
Tabela 38 – Caso 9 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura .....	120

Tabela 39 – Caso 4 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes..	120
Tabela 40 – Caso 4 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes..	121
Tabela 41 – Caso 5 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes..	121
Tabela 42 – Caso 5 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes..	122
Tabela 43 – Caso 6 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes..	122
Tabela 44 – Caso 6 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes..	123
Tabela 45 – Caso 7 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes..	123
Tabela 46 – Caso 7 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes..	123
Tabela 47 – Caso 8 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes..	124
Tabela 48 – Caso 8 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes..	124
Tabela 49 – Caso 9 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes..	124
Tabela 50 – Caso 9 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes..	125
Tabela 51 – Caso 4 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes .....	125
Tabela 52 – Caso 4 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes .....	126
Tabela 53 – Caso 5 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes .....	126
Tabela 54 – Caso 5 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes .....	127
Tabela 55 – Caso 6 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes .....	127
Tabela 56 – Caso 6 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes .....	128
Tabela 57 – Caso 7 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes .....	128
Tabela 58 – Caso 7 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes .....	129
Tabela 59 – Caso 8 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes .....	129
Tabela 60 – Caso 8 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes .....	130
Tabela 61 – Caso 9 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes .....	130

Tabela 62 – Caso 9 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes  
..... 131

As tabelas que originaram os gráficos expostos no Capítulo 4, foram apresentadas a seguir, contendo os momentos resistentes obtidos pela análise numérica através do ANSYS (2004), pelo procedimento AISC-SEM e pelo procedimento utilizado pela Zeman (1999), também estão contidas, nas tabelas, as relações entre os valores obtidos pelo ANSYS (2004) com procedimento AISC-SEN e ANSYS (2004) com o procedimento utilizado pela Zeman (1999).

Tabela 1 – Caso 1, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura

	Caso 1	$C_{b\ AISC} = 1,00$		$C_b\ Reis = 1,00$		$k_c = 1,00$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
(m)	(kN.m)	(kN.m)		(kN.m)		(kN.m)	
5,115	406,15	407,46	0,997	407,46	0,997	230,99	1,758
6,045	295,18	294,80	1,001	294,80	1,001	195,45	1,510
7,130	216,25	214,90	1,006	214,90	1,006	165,71	1,305
8,060	172,24	170,45	1,010	170,45	1,010	146,59	1,175
9,145	136,79	134,72	1,015	134,72	1,015	129,20	1,059
10,075	115,01	112,79	1,020	112,79	1,020	117,27	0,981
11,005	98,47	96,15	1,024	96,15	1,024	107,36	0,917
12,090	83,73	81,35	1,029	81,35	1,029	97,73	0,857
13,020	73,88	71,47	1,034	71,47	1,034	90,75	0,814
14,105	64,71	62,29	1,039	62,29	1,039	83,77	0,773
15,035	58,34	55,93	1,043	55,93	1,043	78,58	0,742
17,515	45,92	43,55	1,054	43,55	1,054	67,46	0,681
20,150	37,24	34,96	1,065	34,96	1,065	58,64	0,635

Tabela 2 – Caso 2, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura

	Caso 2	$C_{b\ AISC} = 1,67$		$C_b\ Reis = 1,84$		$k_c = 0,74$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
(m)	(kN.m)	(kN.m)		(kN.m)		(kN.m)	
7,130	398,83	358,16	1,114	395,41	1,009	224,78	1,774
8,060	318,09	284,09	1,120	313,63	1,014	198,84	1,600
9,145	252,79	224,53	1,126	247,88	1,020	175,25	1,442
10,075	212,56	187,98	1,131	207,52	1,024	159,08	1,336
11,005	181,95	160,25	1,135	176,91	1,028	145,63	1,249
12,090	154,66	135,58	1,141	149,68	1,033	132,56	1,167
13,020	136,41	119,12	1,145	131,50	1,037	123,09	1,108
14,105	119,41	103,82	1,150	114,62	1,042	113,63	1,051
15,035	107,6	93,22	1,154	102,91	1,046	106,60	1,009
17,515	84,547	72,59	1,165	80,14	1,055	91,50	0,924
20,150	68,438	58,26	1,175	64,32	1,064	79,54	0,860

Tabela 3 – Caso 3, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura

	Caso 3	$C_{b\ AISC} = 2,27$		$C_b\ Reis = 2,74$		$k_c = 0,60$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
(m)	(kN.m)	(kN.m)		(kN.m)		(kN.m)	
8,060	461,42	387,39	1,191	467,04	0,988	242,65	1,902
9,145	369,53	306,17	1,207	369,12	1,001	213,86	1,728
10,075	311,18	256,33	1,214	309,03	1,007	194,12	1,603
11,005	267,38	218,52	1,224	263,45	1,015	177,72	1,505
12,090	227,44	184,89	1,230	222,90	1,020	161,77	1,406
13,020	200,83	162,43	1,236	195,83	1,026	150,21	1,337
14,105	175,98	141,57	1,243	170,68	1,031	138,66	1,269
15,035	158,67	127,12	1,248	153,25	1,035	130,08	1,220
17,515	124,8	98,98	1,261	119,34	1,046	111,66	1,118
20,150	101,09	79,45	1,272	95,78	1,055	97,06	1,042

Tabela 4 – Caso 4, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura

	Caso 4	$C_{b\ AISC} = 1,14$		$C_b\ Reis = 1,14$		$k_c = 0,94$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
(m)	(kN.m)	(kN.m)		(kN.m)		(kN.m)	
5,115	443,93	463,02	0,959	464,51	0,956	246,63	1,800
6,045	325,34	335,00	0,971	336,07	0,968	208,69	1,559
7,130	242,35	244,20	0,992	244,98	0,989	176,93	1,370
8,060	193,91	193,70	1,001	194,32	0,998	156,52	1,239
9,145	154,86	153,09	1,012	153,58	1,008	137,95	1,123
10,075	130,06	128,16	1,015	128,58	1,012	125,21	1,039
11,005	111,42	109,26	1,020	109,61	1,016	114,63	0,972
12,090	94,79	92,44	1,025	92,74	1,022	104,34	0,908
13,020	83,65	81,22	1,030	81,48	1,027	96,89	0,863
14,105	73,28	70,79	1,035	71,01	1,032	89,44	0,819
15,035	66,08	63,56	1,040	63,76	1,036	83,91	0,788
17,515	52,01	49,49	1,051	49,65	1,047	72,02	0,722
20,150	42,24	39,72	1,063	39,85	1,060	62,61	0,675

Tabela 5 – Caso 5, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura

	Caso 5	$C_{b\ AISC} = 1,32$		$C_b\ Reis = 1,36$		$k_c = 0,86$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
(m)	(kN.m)	(kN.m)		(kN.m)		(kN.m)	
5,115	507,98	536,13	0,947	554,15	0,917	269,38	1,886
6,045	394,52	387,89	1,017	400,92	0,984	227,94	1,731
7,130	293,40	282,76	1,038	292,26	1,004	193,25	1,518
8,060	234,16	224,28	1,044	231,82	1,010	170,95	1,370
9,145	186,34	177,26	1,051	183,21	1,017	150,67	1,237
10,075	156,79	148,40	1,057	153,39	1,022	136,76	1,146
11,005	134,30	126,51	1,062	130,76	1,027	125,20	1,073
12,090	114,23	107,04	1,067	110,64	1,032	113,97	1,002
13,020	100,80	94,04	1,072	97,20	1,037	105,83	0,952
14,105	88,29	81,96	1,077	84,72	1,042	97,69	0,904
15,035	79,61	73,59	1,082	76,07	1,047	91,64	0,869
17,515	62,64	57,31	1,093	59,23	1,058	78,67	0,796
20,150	50,79	46,00	1,104	47,54	1,068	68,38	0,743

Tabela 6 – Caso 6, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-  
altura

	Caso 6	$C_{b\ AISC} = 2,08$		$C_b\ Reis = 2,27$		$k_c = 0,66$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
(m)	(kN.m)	(kN.m)		(kN.m)		(kN.m)	
7,130	413,34	447,71	0,923	487,82	0,847	249,67	1,656
8,060	338,53	355,11	0,953	386,93	0,875	220,86	1,533
9,145	275,28	280,66	0,981	305,80	0,900	194,66	1,414
10,075	234,70	234,97	0,999	256,02	0,917	176,69	1,328
11,005	203,65	200,31	1,017	218,26	0,933	161,76	1,259
12,090	174,55	169,48	1,030	184,66	0,945	147,24	1,185
13,020	155,08	148,90	1,042	162,24	0,956	136,72	1,134
14,105	136,74	129,78	1,054	141,40	0,967	126,21	1,083
15,035	123,87	116,52	1,063	126,96	0,976	118,40	1,046
17,515	98,42	90,74	1,085	98,87	0,995	101,64	0,968
20,150	80,37	72,83	1,104	79,35	1,013	88,34	0,910

Tabela 7 – Caso 7, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-  
altura

	Caso 7	$C_{b\ AISC} = 1,70$		$C_b\ Reis = 1,82$		$k_c = 0,74$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
(m)	(kN.m)	(kN.m)		(kN.m)		(kN.m)	
6,045	451,99	502,49	0,899	536,53	0,842	263,68	1,714
7,130	345,06	366,30	0,942	391,12	0,882	223,56	1,543
8,060	281,00	290,54	0,967	310,22	0,906	197,76	1,421
9,145	227,22	229,63	0,990	245,18	0,927	174,30	1,304
10,075	193,21	192,25	1,005	205,27	0,941	158,21	1,221
11,005	166,88	163,89	1,018	174,99	0,954	144,84	1,152
12,090	143,06	138,66	1,032	148,06	0,966	131,84	1,085
13,020	126,93	121,82	1,042	130,08	0,976	122,42	1,037
14,105	111,77	106,18	1,053	113,37	0,986	113,01	0,989
15,035	101,16	95,34	1,061	101,80	0,994	106,02	0,954
17,515	80,24	74,24	1,081	79,27	1,012	91,01	0,882
20,150	65,44	59,59	1,098	63,62	1,029	79,10	0,827



Tabela 8 – Caso 8, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-  
altura

	Caso 8	$C_{b\ AISC} = 2,38$		$C_b\ Reis = 2,61$		$k_c = 0,62$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
(m)	(kN.m)	(kN.m)		(kN.m)		(kN.m)	
7,130	435,72	511,66	0,852	560,89	0,777	267,71	1,628
8,060	362,99	405,84	0,894	444,88	0,816	236,82	1,533
9,145	299,31	320,75	0,933	351,61	0,851	208,73	1,434
10,075	257,38	268,54	0,958	294,37	0,874	189,46	1,359
11,005	224,04	228,93	0,979	250,95	0,893	173,45	1,292
12,090	193,41	193,69	0,999	212,32	0,911	157,88	1,225
13,020	171,78	170,17	1,009	186,54	0,921	146,61	1,172
14,105	152,48	148,32	1,028	162,58	0,938	135,33	1,127
15,035	138,43	133,17	1,040	145,98	0,948	126,96	1,090
17,515	110,49	103,70	1,065	113,67	0,972	108,98	1,014
20,150	90,56	83,23	1,088	91,24	0,993	94,73	0,956

Tabela 9 – Caso 9, viga de seção duplamente simétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-  
altura

	Caso 9	$C_{b\ AISC} = 1,92$		$C_b\ Reis = 1,72$		$k_c = 0,76$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
(m)	(kN.m)	(kN.m)		(kN.m)		(kN.m)	
6,045	416,37	566,92	0,734	507,05	0,821	256,34	1,624
7,130	322,42	413,27	0,780	369,63	0,872	217,33	1,484
8,060	263,40	327,79	0,804	293,18	0,898	192,25	1,370
9,145	213,45	259,07	0,824	231,71	0,921	169,44	1,260
10,075	181,65	216,89	0,837	193,99	0,936	153,80	1,181
11,005	156,96	184,90	0,849	165,38	0,949	140,80	1,115
12,090	134,58	156,44	0,860	139,92	0,962	128,17	1,050
13,020	119,42	137,44	0,869	122,93	0,971	119,01	1,003
14,105	105,17	119,79	0,878	107,14	0,982	109,86	0,957
15,035	95,20	107,56	0,885	96,20	0,990	103,06	0,924
17,515	75,52	83,76	0,902	74,91	1,008	88,47	0,854
20,150	61,61	67,23	0,916	60,13	1,025	76,90	0,801

Tabela 10 – Caso 4, viga de seção duplamente simétrica com cargas estabilizantes

	Caso 4	$C_{b\ AISC} = 1,59$		$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b\ AISC}}}$	
$L_b$ (m)	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
6,045	498,74	468,99	1,063	1,74	511,56	0,975	257,47	1,937
7,130	367,09	341,88	1,074	1,73	370,81	0,990	217,68	1,686
8,060	288,01	271,17	1,062	1,72	292,53	0,985	192,04	1,500
9,145	231,63	214,32	1,081	1,70	229,64	1,009	168,68	1,373
10,075	192,74	179,43	1,074	1,69	191,06	1,009	152,63	1,263
11,005	163,96	152,96	1,072	1,68	161,82	1,013	139,28	1,177
12,090	138,25	129,42	1,068	1,67	135,84	1,018	126,28	1,095
13,020	121,04	113,70	1,065	1,66	118,51	1,021	116,86	1,036
14,105	105,20	99,10	1,062	1,64	102,45	1,027	107,42	0,979
15,035	93,94	88,98	1,056	1,63	91,33	1,029	100,42	0,935
17,515	72,54	69,29	1,047	1,60	69,77	1,040	85,38	0,850
20,150	57,41	55,61	1,032	1,57	54,90	1,046	73,48	0,781

Tabela 11 – Caso 5, viga de seção duplamente simétrica com cargas estabilizantes

	Caso 5	$C_{b\ AISC} = 1,84$		$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b\ AISC}}}$	
$L_b$ (m)	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
7,130	480,38	395,87	1,214	2,27	487,45	0,985	249,58	1,925
8,060	381,52	313,99	1,215	2,25	384,22	0,993	220,09	1,734
9,145	301,01	248,16	1,213	2,24	301,26	0,999	193,21	1,558
10,075	251,21	207,76	1,209	2,22	250,41	1,003	174,74	1,438
11,005	213,30	177,12	1,204	2,20	211,85	1,007	159,37	1,338
12,090	179,52	149,85	1,198	2,18	177,60	1,011	144,40	1,243
13,020	156,94	131,65	1,192	2,17	154,77	1,014	133,54	1,175
14,105	135,97	114,75	1,185	2,14	133,61	1,018	122,68	1,108
15,035	121,44	103,03	1,179	2,13	118,96	1,021	114,61	1,060
17,515	93,21	80,23	1,162	2,08	90,58	1,029	97,28	0,958
20,150	73,68	64,40	1,144	2,03	71,03	1,037	83,58	0,882

Tabela 12 – Caso 6, viga de seção duplamente simétrica com cargas estabilizantes

	Caso 6	$C_{b\ AISC} = 2,92$		$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b\ AISC}}}$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
(m)	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)		(kN.m)	
9,145	532,09	392,92	1,354	4,73	637,68	0,834	281,09	1,893
10,075	453,44	328,96	1,378	4,68	528,38	0,858	253,83	1,786
11,005	390,27	280,43	1,392	4,63	445,57	0,876	231,12	1,689
12,090	331,97	237,27	1,399	4,57	372,04	0,892	208,99	1,588
13,020	292,09	208,45	1,401	4,52	323,05	0,904	192,93	1,514
14,105	254,77	181,69	1,402	4,46	277,66	0,918	176,85	1,441
15,035	227,95	163,13	1,397	4,40	246,30	0,925	164,91	1,382
17,515	176,18	127,03	1,387	4,26	185,61	0,949	139,26	1,265
20,150	138,75	101,96	1,361	4,12	143,92	0,964	118,98	1,166

Tabela 13 – Caso 7, viga de seção duplamente simétrica com cargas estabilizantes

	Caso 7	$C_{b\ AISC} = 2,39$		$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b\ AISC}}}$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
(m)	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)		(kN.m)	
9,145	470,76	321,48	1,464	4,08	549,20	0,857	260,86	1,805
10,075	388,18	269,15	1,442	4,03	454,93	0,853	235,53	1,648
11,005	341,23	229,45	1,487	3,99	383,52	0,890	214,42	1,591
12,090	289,39	194,13	1,491	3,94	320,11	0,904	193,86	1,493
13,020	254,11	170,55	1,490	3,89	277,87	0,914	178,93	1,420
14,105	220,86	148,65	1,486	3,83	238,74	0,925	163,99	1,347
15,035	197,56	133,47	1,480	3,78	211,69	0,933	152,88	1,292
17,515	151,65	103,93	1,459	3,66	159,37	0,952	129,04	1,175
20,150	119,43	83,42	1,432	3,53	123,44	0,968	110,18	1,084

Tabela 14 – Caso 8, viga de seção duplamente simétrica com cargas estabilizantes

	Caso 8	$C_{b\ AISC} = 3,33$		$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b\ AISC}}}$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ /	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN} /$
(m)	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)	$M_{R,AI}$	(kN.m)	$M_{R,Ze}$
12,090	520,15	271,17	1,918	7,88	640,79	0,812	274,28	1,896
13,020	444,65	238,23	1,866	7,76	554,51	0,802	252,77	1,759
14,105	401,07	207,64	1,932	7,62	474,60	0,845	231,21	1,735
15,035	358,57	186,44	1,923	7,50	419,40	0,855	215,19	1,666
17,515	276,31	145,18	1,903	7,18	312,73	0,884	180,76	1,529
20,150	216,19	116,53	1,855	6,86	239,64	0,902	153,52	1,408

Tabela 15 – Caso 9, viga de seção duplamente simétrica com cargas estabilizantes

	Caso 9	$C_{b\ AISC} = 2,69$		$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b\ AISC}}}$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ /	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN} /$
(m)	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)	$M_{R,AI}$	(kN.m)	$M_{R,Ze}$
10,075	481,64	303,65	1,586	4,94	557,53	0,864	322,10	1,495
11,005	409,69	258,86	1,583	4,88	468,88	0,874	292,88	1,399
12,090	347,01	219,02	1,584	4,80	390,41	0,889	264,47	1,312
13,020	304,24	192,42	1,581	4,73	338,16	0,900	243,84	1,248
14,105	263,84	167,71	1,573	4,65	289,77	0,911	223,18	1,182
15,035	235,49	150,59	1,564	4,58	256,33	0,919	207,82	1,133
17,515	179,58	117,26	1,531	4,40	191,70	0,937	174,83	1,027
20,150	140,34	94,12	1,491	4,22	147,38	0,952	148,73	0,944

Tabela 16 – Caso 4, viga de seção duplamente simétrica com cargas desestabilizantes

	Caso 4	$C_{b,AISC} = 0,81$		$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ /	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ /
(m)	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)	$M_{R,AI}$	(kN.m)	$M_{R,Ze}$
4,030	441,56	527,39	0,837	0,73	472,95	0,934	250,13	1,765
5,115	294,23	330,73	0,890	0,73	297,81	0,988	197,48	1,490
6,045	217,35	239,28	0,908	0,73	216,41	1,004	167,46	1,298
7,130	160,39	174,43	0,919	0,74	158,66	1,011	142,39	1,126
8,060	128,54	138,35	0,929	0,74	126,53	1,016	126,30	1,018
9,145	103,33	109,35	0,945	0,75	100,69	1,026	111,69	0,925
10,075	87,62	91,55	0,957	0,75	84,83	1,033	101,70	0,861
11,005	75,63	78,04	0,969	0,76	72,78	1,039	93,41	0,810
12,090	64,93	66,03	0,983	0,76	62,07	1,046	85,36	0,761
13,020	57,76	58,01	0,996	0,77	54,92	1,052	79,55	0,726
14,105	51,09	50,56	1,010	0,77	48,26	1,059	73,73	0,693
15,035	46,44	45,40	1,023	0,78	43,64	1,064	69,42	0,669
17,515	37,34	35,35	1,056	0,80	34,64	1,078	60,16	0,621
20,150	30,95	28,37	1,091	0,81	28,36	1,091	52,82	0,586

Tabela 17 – Caso 5, viga de seção duplamente simétrica com cargas desestabilizantes

	Caso 5	$C_{b,AISC} = 0,94$		$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ /	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ /
(m)	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)	$M_{R,AI}$	(kN.m)	$M_{R,Ze}$
5,115	325,69	382,95	0,850	0,81	328,17	0,992	207,30	1,571
6,045	240,26	277,06	0,867	0,81	238,58	1,007	175,83	1,366
7,130	177,73	201,97	0,880	0,81	175,06	1,015	149,56	1,188
8,060	142,81	160,20	0,891	0,82	139,72	1,022	132,72	1,076
9,145	114,61	126,61	0,905	0,83	111,30	1,030	117,44	0,976
10,075	97,23	106,00	0,917	0,83	93,85	1,036	106,98	0,909
11,005	84,01	90,37	0,930	0,84	80,61	1,042	98,31	0,855
12,090	72,22	76,46	0,945	0,85	68,83	1,049	89,89	0,803
13,020	64,33	67,17	0,958	0,85	60,96	1,055	83,81	0,768
14,105	56,97	58,55	0,973	0,86	53,63	1,062	77,73	0,733
15,035	51,86	52,57	0,987	0,87	48,56	1,068	73,22	0,708
17,515	41,84	40,93	1,022	0,89	38,66	1,082	63,55	0,658
20,150	34,80	32,86	1,059	0,91	31,75	1,096	55,88	0,623

Tabela 18 – Caso 6, viga de seção duplamente simétrica com cargas desestabilizantes

	Caso 6	$C_{b,AISC} = 1,49$		$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ /	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ /
(m)	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)	$M_{R,AI}$	(kN.m)	$M_{R,Ze}$
6,045	279,14	438,69	0,636	1,01	299,01	0,934	196,85	1,418
7,130	210,51	319,79	0,658	1,02	220,03	0,957	167,68	1,255
8,060	171,64	253,65	0,677	1,03	176,08	0,975	148,99	1,152
9,145	139,44	200,47	0,696	1,04	140,75	0,991	132,06	1,056
10,075	119,25	167,83	0,711	1,06	119,07	1,002	120,49	0,990
11,005	103,84	143,08	0,726	1,07	102,61	1,012	110,91	0,936
12,090	90,01	121,06	0,744	1,08	87,98	1,023	101,63	0,886
13,020	80,71	106,35	0,759	1,09	78,20	1,032	94,92	0,850
14,105	72,01	92,70	0,777	1,11	69,13	1,042	88,24	0,816
15,035	65,95	83,23	0,792	1,12	62,83	1,050	83,29	0,792
17,515	54,04	64,81	0,834	1,16	50,56	1,069	72,68	0,744
20,150	45,65	52,02	0,877	1,20	42,01	1,087	64,28	0,710

Tabela 19 – Caso 7, viga de seção duplamente simétrica com cargas desestabilizantes

	Caso 7	$C_{b,AISC} = 1,22$		$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ /	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ /
(m)	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)	$M_{R,AI}$	(kN.m)	$M_{R,Ze}$
5,115	290,74	496,10	0,586	0,76	311,38	0,934	201,93	1,440
6,045	217,41	358,92	0,606	0,77	226,90	0,958	171,48	1,268
7,130	163,31	261,65	0,624	0,78	167,00	0,978	146,08	1,118
8,060	132,49	207,53	0,638	0,78	133,65	0,991	129,80	1,021
9,145	107,33	164,02	0,654	0,79	106,86	1,004	115,07	0,933
10,075	91,72	137,32	0,668	0,80	90,42	1,014	105,00	0,873
11,005	79,80	117,06	0,682	0,81	77,95	1,024	96,67	0,825
12,090	69,12	99,05	0,698	0,82	66,84	1,034	88,59	0,780
13,020	62,35	87,02	0,717	0,83	59,43	1,049	82,75	0,753
14,105	55,27	75,84	0,729	0,84	52,55	1,052	76,94	0,718
15,035	50,61	68,10	0,743	0,85	47,78	1,059	72,63	0,697
17,515	41,48	53,03	0,782	0,88	38,47	1,078	63,40	0,654
20,150	35,05	42,56	0,823	0,92	32,00	1,095	56,10	0,625

Tabela 20 – Caso 8, viga de seção duplamente simétrica com cargas desestabilizantes

	Caso 8	$C_{b,AISC} = 1,70$			$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ /	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ /	
(m)	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)	$M_{R,AI}$	(kN.m)	$M_{R,Ze}$	
6,045	214,62	501,35	0,428	0,77	227,23	0,944	171,60	1,251	
7,130	162,98	365,47	0,446	0,78	167,62	0,972	146,35	1,114	
8,060	133,05	289,89	0,459	0,79	134,45	0,990	130,19	1,022	
9,145	108,35	229,11	0,473	0,80	107,80	1,005	115,57	0,938	
10,075	92,97	191,81	0,485	0,81	91,46	1,017	105,60	0,880	
11,005	81,19	163,52	0,497	0,82	79,06	1,027	97,36	0,834	
12,090	70,65	138,35	0,511	0,84	68,05	1,038	89,38	0,790	
13,020	63,58	121,55	0,523	0,85	60,71	1,047	83,63	0,760	
14,105	56,98	105,94	0,538	0,87	53,88	1,058	77,91	0,731	
15,035	52,40	95,12	0,551	0,88	49,16	1,066	73,68	0,711	
17,515	43,44	74,07	0,587	0,92	39,99	1,086	64,64	0,672	
20,150	37,18	59,45	0,625	0,96	33,63	1,106	57,51	0,647	

Tabela 21 – Caso 9, viga de seção duplamente simétrica com cargas desestabilizantes

	Caso 9	$C_{b,AISC} = 1,37$			$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ /	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ /	
(m)	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)	$M_{R,AI}$	(kN.m)	$M_{R,Ze}$	
6,045	160,56	404,94	0,396	0,56	166,15	0,966	146,73	1,094	
7,130	120,56	295,19	0,408	0,57	122,47	0,984	125,10	0,964	
8,060	97,81	234,14	0,418	0,58	98,16	0,996	111,24	0,879	
9,145	79,29	185,05	0,428	0,58	78,63	1,008	98,71	0,803	
10,075	67,84	154,92	0,438	0,59	66,64	1,018	90,15	0,753	
11,005	59,10	132,07	0,447	0,60	57,55	1,027	83,07	0,712	
12,090	51,30	111,74	0,459	0,61	49,48	1,037	76,21	0,673	
13,020	46,08	98,17	0,469	0,62	44,08	1,045	71,27	0,647	
14,105	41,21	85,57	0,482	0,63	39,08	1,055	66,34	0,621	
15,035	37,83	76,83	0,492	0,64	35,61	1,062	62,70	0,603	
17,515	31,22	59,83	0,522	0,66	28,86	1,082	54,91	0,569	
20,150	26,59	48,02	0,554	0,69	24,17	1,100	48,76	0,545	

Tabela 22 – Caso 1 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura

$L_b$ (m)	Caso 1	$C_{b\ AISC} = 1,00$		$C_b$ Reis			$k_c = 1,00$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
5,115	429,41	439,71	0,977	1,00	439,71	0,977	231,92	1,852
6,045	317,85	323,38	0,983	1,00	323,38	0,983	196,24	1,620
7,130	238,23	240,72	0,990	1,00	240,72	0,990	166,38	1,432
8,060	193,66	194,60	0,995	1,00	194,60	0,995	147,18	1,316
9,145	157,56	157,38	1,001	1,00	157,38	1,001	129,72	1,215
10,075	135,24	134,41	1,006	1,00	134,41	1,006	117,74	1,149
11,005	118,15	116,90	1,011	1,00	116,90	1,011	107,79	1,096
12,090	102,80	101,20	1,016	1,00	101,20	1,016	98,12	1,048
13,020	92,44	90,64	1,020	1,00	90,64	1,020	91,11	1,015
14,105	82,69	80,73	1,024	1,00	80,73	1,024	84,10	0,983
15,035	75,84	73,80	1,028	1,00	73,80	1,028	78,90	0,961
17,515	62,20	60,06	1,036	1,00	60,06	1,036	67,73	0,918
20,150	52,35	50,22	1,042	1,00	50,22	1,042	58,87	0,889

Tabela 23 – Caso 1 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura

$L_b$ (m)	Caso 1	$C_{b\ AISC} = 1,00$		$C_b$ Reis			$k_c = 1,00$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
6,045	511,92	498,88	1,026	1,00	498,88	1,026	330,51	1,549
7,130	378,00	366,87	1,030	1,00	366,87	1,030	280,21	1,349
8,060	303,18	293,32	1,034	1,00	293,32	1,034	247,88	1,223
9,145	242,75	234,06	1,037	1,00	234,06	1,037	218,47	1,111
10,075	205,50	197,59	1,040	1,00	197,59	1,040	198,30	1,036
11,005	177,11	169,85	1,043	1,00	169,85	1,043	181,55	0,976
12,090	151,71	145,08	1,046	1,00	145,08	1,046	165,25	0,918
13,020	134,66	128,47	1,048	1,00	128,47	1,048	153,45	0,878
14,105	118,72	112,97	1,051	1,00	112,97	1,051	141,65	0,838
15,035	107,58	102,17	1,053	1,00	102,17	1,053	132,88	0,810
17,515	85,66	80,96	1,058	1,00	80,96	1,058	114,07	0,751
20,150	70,16	66,02	1,063	1,00	66,02	1,063	99,15	0,708



Tabela 24 – Caso 2 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura

$L_b$ (m)	Caso 2	$C_{b\ AISC} = 1,67$		$C_b$ Reis			$k_c = 0,75$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
7,130	440,25	401,20	1,0973	1,86	446,85	0,985	221,83	1,9846
8,060	357,83	324,34	1,1033	1,85	360,81	0,992	196,24	1,8234
9,145	290,88	262,29	1,109	1,85	291,35	0,998	172,96	1,6818
10,075	249,39	224,02	1,1132	1,85	248,50	1,004	156,99	1,5886
11,005	217,61	194,83	1,1169	1,85	215,81	1,008	143,72	1,5141
12,090	189,03	168,67	1,1207	1,84	186,53	1,013	130,83	1,4449
13,020	169,72	151,06	1,1235	1,84	166,82	1,017	121,48	1,3971
14,105	151,56	134,55	1,1264	1,84	148,33	1,022	112,14	1,3516
15,035	138,80	123,00	1,1285	1,83	135,40	1,025	105,20	1,3194
17,515	113,40	100,10	1,1329	1,83	109,77	1,033	90,30	1,2558
20,150	95,06	83,70	1,1357	1,82	91,43	1,040	78,50	1,211

Tabela 25 – Caso 2 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura

$L_b$ (m)	Caso 2	$C_{b\ AISC} = 1,67$		$C_b$ Reis			$k_c = 0,75$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
9,145	445,95	390,10	1,143	2,86	450,33	0,990	291,294	1,531
10,075	377,68	329,32	1,147	2,82	379,62	0,995	264,406	1,428
11,005	325,57	283,08	1,150	2,79	325,85	0,999	242,062	1,345
12,090	278,87	241,79	1,153	2,75	277,84	1,004	220,338	1,266
13,020	247,48	214,11	1,156	2,71	245,66	1,007	204,6	1,210
14,105	218,04	188,28	1,158	2,67	215,64	1,011	188,861	1,154
15,035	197,59	170,28	1,160	2,64	194,73	1,015	177,179	1,115
17,515	157,16	134,94	1,165	2,56	153,70	1,023	152,092	1,033
20,150	128,51	110,03	1,168	2,49	124,81	1,030	132,203	0,972

Tabela 26 – Caso 3, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura

	Caso 3	$C_{b\ AISC} = 1,77$			$C_b$ Reis			$k_c = 0,60$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$	
(m)	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)		(kN.m)		
9,145	496,91	278,12	1,787	3,21	521,98	0,952	216,20	2,298	
10,075	425,13	237,54	1,790	3,19	445,82	0,954	196,24	2,166	
11,005	369,77	206,58	1,790	3,17	387,72	0,954	179,66	2,058	
12,090	319,77	178,85	1,788	3,15	335,66	0,953	163,53	1,955	
13,020	285,93	160,18	1,785	3,13	300,62	0,951	151,85	1,883	
14,105	254,08	142,67	1,781	3,10	267,77	0,949	140,17	1,813	
15,035	231,72	130,42	1,777	3,09	244,77	0,947	131,50	1,762	
17,515	187,32	106,14	1,765	3,04	199,20	0,940	112,88	1,659	
20,150	155,48	88,75	1,752	3,00	166,58	0,933	98,12	1,585	

Tabela 27 – Caso 4 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura

	Caso 4	$C_{b\ AISC} = 1,24$			$C_b$ Reis			$k_c = 0,94$	
$L_b$	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$	
(m)	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)		(kN.m)		
6,045	397,55	400,39	0,993	1,26	408,88	0,972	218,36	1,821	
7,130	298,75	298,04	1,002	1,26	303,41	0,985	185,13	1,614	
8,060	242,50	240,94	1,006	1,26	244,56	0,992	163,77	1,481	
9,145	196,95	194,85	1,011	1,25	197,08	0,999	144,34	1,365	
10,075	168,58	166,42	1,013	1,25	167,80	1,005	131,01	1,287	
11,005	146,85	144,73	1,015	1,24	145,49	1,009	119,94	1,224	
12,090	127,31	125,30	1,016	1,24	125,50	1,014	109,18	1,166	
13,020	114,15	112,22	1,017	1,24	112,06	1,019	101,38	1,126	
14,105	101,71	99,96	1,018	1,23	99,47	1,023	93,58	1,087	
15,035	93,01	91,37	1,018	1,23	90,67	1,026	87,79	1,059	
17,515	75,71	74,36	1,018	1,22	73,27	1,033	75,36	1,005	
20,150	63,28	62,18	1,018	1,21	60,85	1,040	65,51	0,966	

Tabela 28 – Caso 4 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na  
meia-altura

$L_b$ (m)	Caso 4	$C_{b\ AISC} = 1,04$			$C_b$ Reis			$k_c = 0,94$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$	
6,045	507,93	520,32	0,976	1,01	504,47	1,007	337,53	1,505	
7,130	380,23	382,64	0,994	1,01	372,16	1,022	286,17	1,329	
8,060	307,28	305,93	1,004	1,02	298,40	1,030	253,15	1,214	
9,145	247,67	244,12	1,015	1,02	238,93	1,037	223,11	1,110	
10,075	210,64	206,08	1,022	1,02	202,32	1,041	202,52	1,040	
11,005	182,28	177,15	1,029	1,03	174,44	1,045	185,41	0,983	
12,090	156,82	151,31	1,036	1,03	149,52	1,049	168,77	0,929	
13,020	139,66	133,99	1,042	1,03	132,78	1,052	156,71	0,891	
14,105	123,58	117,82	1,049	1,04	117,16	1,055	144,66	0,854	
15,035	112,33	106,56	1,054	1,04	106,24	1,057	135,71	0,828	
17,515	90,10	84,44	1,067	1,05	84,78	1,063	116,49	0,773	
20,150	74,27	68,85	1,079	1,05	69,58	1,067	101,26	0,733	

Tabela 29 – Caso 5 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na  
meia-altura

$L_b$ (m)	Caso 5	$C_{b\ AISC} = 1,43$			$C_b$ Reis			$k_c = 0,86$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$	
6,045	405,32	463,61	0,874	1,57	506,74	0,800	234,964	1,725	
7,130	316,96	345,10	0,918	1,56	375,67	0,844	199,209	1,591	
8,060	263,18	278,99	0,943	1,55	302,57	0,870	176,223	1,493	
9,145	223,88	225,62	0,992	1,55	243,60	0,919	155,315	1,441	
10,075	195,78	192,70	1,016	1,54	207,24	0,945	140,979	1,389	
11,005	172,87	167,58	1,032	1,54	179,52	0,963	129,065	1,339	
12,090	151,43	145,08	1,044	1,53	154,71	0,979	117,482	1,289	
13,020	136,55	129,94	1,051	1,52	138,02	0,989	109,091	1,252	
14,105	122,30	115,74	1,057	1,52	122,40	0,999	100,699	1,215	
15,035	112,17	105,80	1,060	1,51	111,47	1,006	94,4701	1,187	
17,515	91,72	86,10	1,065	1,50	89,89	1,020	81,0938	1,131	
20,150	76,80	72,00	1,067	1,48	74,50	1,031	70,4893	1,090	

Tabela 30 – Caso 5 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura

	Caso 5	$C_{bAISC} = 1,21$			$C_b$ Reis			$k_c = 0,86$	
$L_b$ (m)	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$	
7,130	359,30	443,05	0,811	1,19	436,43	0,823	307,93	1,167	
8,060	303,84	354,23	0,858	1,19	350,17	0,868	272,40	1,115	
9,145	263,79	282,66	0,933	1,20	280,64	0,940	240,08	1,099	
10,075	230,91	238,62	0,968	1,20	237,80	0,971	217,92	1,060	
11,005	203,44	205,12	0,992	1,21	205,18	0,992	199,51	1,020	
12,090	177,52	175,20	1,013	1,21	176,01	1,009	181,60	0,978	
13,020	159,47	155,14	1,028	1,22	156,42	1,019	168,63	0,946	
14,105	142,19	136,42	1,042	1,22	138,11	1,029	155,66	0,913	
15,035	129,89	123,38	1,053	1,23	125,34	1,036	146,03	0,889	
17,515	105,14	97,78	1,075	1,24	100,17	1,050	125,35	0,839	
20,150	87,18	79,73	1,094	1,25	82,34	1,059	108,96	0,800	

Tabela 31 – Caso 6 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na meia-altura

	Caso 6	$C_{bAISC} = 1,77$			$C_b$ Reis			$k_c = 0,79$	
$L_b$ (m)	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$	
8,060	457,34	343,48	1,331	2,81	546,47	0,837	195,534	2,339	
9,145	378,98	277,77	1,364	2,78	438,24	0,865	172,335	2,199	
10,075	328,47	237,25	1,385	2,76	371,60	0,884	156,428	2,100	
11,005	288,74	206,33	1,399	2,74	320,82	0,900	143,208	2,016	
12,090	252,24	178,62	1,412	2,72	275,42	0,916	130,356	1,935	
13,020	227,16	159,98	1,420	2,70	244,93	0,927	121,045	1,877	
14,105	203,27	142,50	1,426	2,68	216,41	0,939	111,734	1,819	
15,035	186,32	130,26	1,430	2,66	196,51	0,948	104,823	1,777	
17,515	152,19	106,01	1,436	2,62	157,29	0,968	89,9804	1,691	
20,150	127,31	88,64	1,436	2,58	129,48	0,983	78,2138	1,628	

Tabela 32 – Caso 6 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na  
meia-altura

	Caso 6	$C_{b\ AISC} = 1,49$		$k_c = 0,79$	
$L_b$ (m)	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
8,060	483,29	289,34	1,670	302,25	1,599
9,145	398,19	233,99	1,702	266,39	1,495
10,075	343,76	199,85	1,720	241,80	1,422
11,005	301,23	173,80	1,733	221,37	1,361
12,090	262,37	150,47	1,744	201,50	1,302
13,020	235,84	134,76	1,750	187,11	1,260
14,105	210,68	120,03	1,755	172,72	1,220
15,035	192,89	109,72	1,758	162,03	1,190
17,515	157,27	89,30	1,761	139,09	1,131
20,150	131,46	74,67	1,761	120,90	1,087

Tabela 33 – Caso 7 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na  
meia-altura

	Caso 7	$C_{b\ AISC} = 1,44$			$C_b$ Reis		$k_c = 0,87$	
$L_b$ (m)	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
6,045	383,65	467,00	0,822	2,38	769,42	0,499	235,823	1,627
7,130	318,20	347,63	0,915	2,36	568,08	0,560	199,937	1,592
8,060	282,62	281,03	1,006	2,34	455,82	0,620	176,868	1,598
9,145	252,14	227,27	1,109	2,32	365,30	0,690	155,883	1,618
10,075	232,47	194,11	1,198	2,30	309,55	0,751	141,494	1,643
11,005	213,03	168,81	1,262	2,28	267,08	0,798	129,537	1,645
12,090	191,98	146,15	1,314	2,26	229,13	0,838	117,912	1,628
13,020	176,07	130,89	1,345	2,25	203,63	0,865	109,489	1,608
14,105	159,96	116,59	1,372	2,23	179,81	0,890	101,067	1,583
15,035	148,03	106,57	1,389	2,21	163,17	0,907	94,8156	1,561
17,515	122,87	86,73	1,417	2,17	130,42	0,942	81,3904	1,510
20,150	103,69	72,53	1,430	2,13	107,20	0,967	70,747	1,466

Tabela 34 – Caso 7 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na  
meia-altura

	Caso 7	$C_{b\ AISC} = 1,22$		$k_c = 0,87$	
$L_b$ (m)	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
6,045	462,15	393,39	1,175	364,532	1,268
7,130	356,68	292,84	1,218	309,059	1,154
8,060	298,91	236,73	1,263	273,399	1,093
9,145	250,62	191,45	1,309	240,962	1,040
10,075	232,37	163,51	1,421	218,719	1,062
11,005	212,06	142,20	1,491	200,236	1,059
12,090	190,38	123,11	1,546	182,266	1,045
13,020	174,23	110,26	1,580	169,247	1,029
14,105	158,07	98,21	1,610	156,228	1,012
15,035	146,20	89,77	1,629	146,564	0,998
17,515	121,40	73,06	1,662	125,812	0,965
20,150	102,66	61,09	1,680	109,359	0,939

Tabela 35 – Caso 8 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na  
meia-altura

	Caso 8	$C_{b\ AISC} = 2,02$		$C_b$ Reis			$k_c = 0,73$	
$L_b$ (m)	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
8,060	456,39	392,55	1,163	3,81	741,52	0,615	209,04	2,183
9,145	380,94	317,46	1,200	3,76	591,70	0,644	184,23	2,068
10,075	331,74	271,14	1,224	3,72	499,52	0,664	167,23	1,984
11,005	292,84	235,80	1,242	3,67	429,38	0,682	153,10	1,913
12,090	257,00	204,14	1,259	3,62	366,75	0,701	139,36	1,844
13,020	232,35	182,83	1,271	3,58	324,77	0,715	129,40	1,796
14,105	208,87	162,85	1,283	3,54	285,58	0,731	119,45	1,749
15,035	192,20	148,86	1,291	3,50	258,28	0,744	112,06	1,715
17,515	158,63	121,15	1,309	3,41	204,68	0,775	96,19	1,649
20,150	134,10	101,31	1,324	3,32	166,90	0,803	83,614	1,604

Tabela 36 – Caso 8 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na  
meia-altura

	Caso 8	$C_{b\ AISC} = 1,70$		$k_c = 0,73$	
$L_b$ (m)	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
9,145	472,34	267,42	1,766	284,786	1,659
10,075	411,20	228,40	1,800	258,498	1,591
11,005	362,26	198,63	1,824	236,653	1,531
12,090	316,71	171,96	1,842	215,415	1,470
13,020	285,14	154,01	1,851	200,028	1,426
14,105	254,91	137,18	1,858	184,642	1,381
15,035	233,36	125,40	1,861	173,22	1,347
17,515	189,84	102,05	1,860	148,694	1,277
20,150	158,06	85,34	1,852	129,249	1,223

Tabela 37 – Caso 9 e Posição A, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na  
meia-altura

	Caso 9	$C_{b\ AISC} = 1,63$		$C_b$ Reis			$k_c = 0,82$	
$L_b$ (m)	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
6,045	337,64	526,88	0,641	2,55	823,01	0,410	250,48	1,348
7,130	267,07	392,20	0,681	2,52	605,49	0,441	212,37	1,258
8,060	230,64	317,06	0,727	2,49	484,27	0,476	187,86	1,228
9,145	199,60	256,41	0,778	2,46	386,59	0,516	165,57	1,206
10,075	182,48	219,00	0,833	2,43	326,48	0,559	150,29	1,214
11,005	168,91	190,45	0,887	2,40	280,74	0,602	137,59	1,228
12,090	153,33	164,88	0,930	2,37	239,89	0,639	125,24	1,224
13,020	141,44	147,67	0,958	2,34	212,49	0,666	116,30	1,216
14,105	130,17	131,53	0,990	2,32	186,91	0,696	107,35	1,213
15,035	121,60	120,24	1,011	2,29	169,08	0,719	100,71	1,207
17,515	103,01	97,85	1,053	2,23	134,07	0,768	86,45	1,192
20,150	88,41	81,83	1,081	2,18	109,37	0,808	75,15	1,177

Tabela 38 – Caso 9 e Posição B, viga de seção monossimétrica com momentos ou cargas aplicadas na  
meia-altura

	Caso 9		$C_{b\ AISC} = 1,37$		$k_c = 0,82$	
$L_b$ (m)	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$	
6,045	361,98	443,83	0,816	387,19	0,935	
7,130	287,70	330,38	0,871	328,27	0,876	
8,060	247,22	267,08	0,926	290,40	0,851	
9,145	215,04	215,99	0,996	255,94	0,840	
10,075	197,48	184,48	1,071	232,32	0,850	
11,005	186,97	160,43	1,165	212,68	0,879	
12,090	175,24	138,89	1,262	193,60	0,905	
13,020	164,28	124,39	1,321	179,77	0,914	
14,105	150,84	110,80	1,361	165,94	0,909	
15,035	141,98	101,28	1,402	155,68	0,912	
17,515	119,71	82,43	1,452	133,63	0,896	
20,150	101,74	68,93	1,476	116,16	0,876	

Tabela 39 – Caso 4 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes

	Caso 4		$C_b = 1,59$		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b\ AISC}}}$	
$L_b$ (m)	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$	
7,130	403,14	382,97	1,053	209,85	1,921	
8,060	325,28	309,60	1,051	185,64	1,752	
9,145	261,60	250,37	1,045	163,61	1,599	
10,075	222,03	213,84	1,038	148,51	1,495	
11,005	191,72	185,97	1,031	135,96	1,410	
12,090	164,52	161,00	1,022	123,76	1,329	
13,020	146,21	144,19	1,014	114,92	1,272	
14,105	129,05	128,44	1,005	106,08	1,217	
15,035	117,06	117,41	0,997	99,52	1,176	
17,515	93,40	95,55	0,978	85,43	1,093	
20,150	76,61	79,90	0,959	74,26	1,032	



Tabela 40 – Caso 4 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 4 $C_b = 1,59$			$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
8,060	492,93	466,65	1,056	1,65	483,04	1,020	312,65	1,577
9,145	391,58	372,37	1,052	1,63	381,42	1,027	275,56	1,421
10,075	328,71	314,35	1,046	1,61	319,04	1,030	250,12	1,314
11,005	280,72	270,22	1,039	1,60	271,66	1,033	228,99	1,226
12,090	237,82	230,80	1,030	1,58	229,51	1,036	208,44	1,141
13,020	209,07	204,38	1,023	1,57	201,33	1,038	193,55	1,080
14,105	182,28	179,72	1,014	1,55	175,16	1,041	178,66	1,020
15,035	163,66	162,54	1,007	1,54	156,99	1,042	167,61	0,976
17,515	127,28	128,81	0,988	1,50	121,59	1,047	143,88	0,885
20,150	101,91	105,03	0,970	1,47	96,97	1,051	125,06	0,815

Tabela 41 – Caso 5 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 5 $C_b = 1,84$			$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
8,060	429,76	358,48	1,199	2,25	438,60	0,980	199,76	2,151
9,145	344,54	289,90	1,188	2,22	348,95	0,987	176,06	1,957
10,075	291,62	247,60	1,178	2,19	293,81	0,993	159,81	1,825
11,005	251,16	215,33	1,166	2,16	251,91	0,997	146,30	1,717
12,090	214,88	186,42	1,153	2,12	214,52	1,002	133,17	1,614
13,020	190,47	166,96	1,141	2,09	189,47	1,005	123,66	1,540
14,105	167,65	148,72	1,127	2,06	166,12	1,009	114,15	1,469
15,035	151,71	135,94	1,116	2,03	149,88	1,012	107,09	1,417
17,515	120,35	110,63	1,088	1,97	118,04	1,020	91,92	1,309
20,150	98,17	92,51	1,061	1,91	95,68	1,026	79,90	1,229

Tabela 42 – Caso 5 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 5 $C_b = 1,84$			$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ /	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ /
	(kN.m)	(kN.m)	(kN.m)		(kN.m)	$M_{R,AI}$	(kN.m)	$M_{R,Ze}$
9,145	500,03	431,16	1,160	2,08	486,91	1,027	296,52	1,686
10,075	419,15	363,99	1,152	2,06	406,85	1,030	269,15	1,557
11,005	357,47	312,88	1,143	2,04	346,09	1,033	246,40	1,451
12,090	302,37	267,25	1,131	2,01	292,02	1,035	224,29	1,348
13,020	265,48	236,65	1,122	1,99	255,91	1,037	208,27	1,275
14,105	231,14	208,10	1,111	1,97	222,35	1,039	192,25	1,202
15,035	207,28	188,20	1,101	1,95	199,08	1,041	180,36	1,149
17,515	160,74	149,14	1,078	1,90	153,77	1,045	154,82	1,038
20,150	128,33	121,61	1,055	1,85	122,31	1,049	134,57	0,954

Tabela 43 – Caso 6 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 6 $C_b = 2,27$			$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ /	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,AN}$ /
	(kN.m)	(kN.m)	(kN.m)		(kN.m)	$M_{R,AI}$	(kN.m)	$M_{R,Ze}$
8,060	731,52	441,35	1,66	-	-	-	221,65	3,300
9,145	601,66	356,92	1,69	-	-	-	195,35	3,080
10,075	516,79	304,84	1,70	-	-	-	177,32	2,915
11,005	449,59	265,11	1,70	4,47	522,92	0,860	162,33	2,770
12,090	387,60	229,52	1,69	4,36	441,49	0,878	147,77	2,623
13,020	344,99	205,56	1,68	4,27	387,11	0,891	137,21	2,514
14,105	304,46	183,10	1,66	4,17	336,58	0,905	126,66	2,404
15,035	275,80	167,37	1,65	4,09	301,55	0,915	118,82	2,321
17,515	218,57	136,21	1,60	3,89	233,36	0,937	102,00	2,143
20,150	177,55	113,90	1,56	3,70	186,01	0,955	88,66	2,003

Tabela 44 – Caso 6 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 6 $C_b = 2,27$			$C_b$	$C_b$ Reis		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$		$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
13,020	481,10	205,56	2,340	4,05	520,01	0,925	231,091	2,082
14,105	420,88	183,10	2,299	3,98	449,25	0,937	213,315	1,973
15,035	378,44	167,37	2,261	3,92	400,27	0,945	200,12	1,891
17,515	294,23	136,21	2,160	3,77	305,23	0,964	171,785	1,713
20,150	234,52	113,90	2,059	3,63	239,60	0,979	149,321	1,571

Tabela 45 – Caso 7 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 7 $C_b = 1,86$			$C_b$	$C_b$ Reis		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$		$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
10,075	467,73	249,42	1,88	-	-	-	160,39	2,916
11,005	405,24	216,91	1,87	3,96	463,04	0,875	146,84	2,760
12,090	347,94	187,79	1,85	3,86	390,30	0,891	133,66	2,603
13,020	308,70	168,18	1,84	3,77	341,75	0,903	124,11	2,487
14,105	271,53	149,81	1,81	3,67	296,67	0,915	114,56	2,370
15,035	245,33	136,94	1,79	3,60	265,42	0,924	107,48	2,283
17,515	193,23	111,45	1,73	3,41	204,66	0,944	92,26	2,094
20,150	156,09	93,19	1,67	3,24	162,51	0,960	80,20	1,946

Tabela 46 – Caso 7 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 7 $C_b = 1,86$			$C_b$	$C_b$ Reis		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$		$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,Ze}$
12,090	455,80	187,79	2,427	3,32	481,97	0,946	225,11	2,025
13,020	401,71	168,18	2,388	3,27	420,68	0,955	209,03	1,922
14,105	350,66	149,81	2,341	3,22	363,79	0,964	192,95	1,817
15,035	314,86	136,94	2,299	3,18	324,39	0,971	181,02	1,739
17,515	244,20	111,45	2,191	3,06	247,93	0,985	155,39	1,572
20,150	194,40	93,19	2,086	2,95	195,07	0,997	135,07	1,439

Tabela 47 – Caso 8 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 8 $C_b = 2,59$			$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
14,105	480,52	209,25	2,296	-	-	-	135,40	3,549
15,035	433,28	191,28	2,265	6,91	510,07	0,849	127,03	3,411
17,515	338,57	155,67	2,175	6,43	386,32	0,876	109,04	3,105
20,150	270,71	130,17	2,080	6,00	301,22	0,899	94,78	2,856

Tabela 48 – Caso 8 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 8 $C_b = 2,59$			$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
17,515	435,55	155,67	2,798	5,95	481,75	0,904	183,65	2,372
20,150	344,33	130,17	2,645	5,65	372,77	0,924	159,63	2,157

Tabela 49 – Caso 9 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 9 $C_b = 2,09$			$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
11,005	507,36	244,72	2,07	-	-	-	155,97	3,253
12,090	433,29	211,86	2,05	4,94	500,37	0,866	141,97	3,052
13,020	382,47	189,75	2,02	4,80	435,46	0,878	131,83	2,901
14,105	334,29	169,01	1,98	4,65	375,30	0,891	121,69	2,747
15,035	300,32	154,50	1,94	4,52	333,71	0,900	114,16	2,631
17,515	232,98	125,73	1,85	4,21	253,12	0,920	98,00	2,377
20,150	185,28	105,14	1,76	3,94	197,65	0,937	85,18	2,175

Tabela 50 – Caso 9 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas estabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 9 $C_b = 2,09$			$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,Ze}$
12,090	507,76	211,86	2,40	-	-	-	239,10	2,124
13,020	446,67	189,75	2,35	3,69	473,85	0,943	222,03	2,012
14,105	388,98	169,01	2,30	3,62	408,67	0,952	204,95	1,898
15,035	348,49	154,50	2,26	3,56	363,59	0,958	192,27	1,813
17,515	268,61	125,73	2,14	3,41	276,15	0,973	165,05	1,628
20,150	212,46	105,14	2,02	3,27	215,88	0,984	143,46	1,481

Tabela 51 – Caso 4 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 4 $C_b = 0,81$			$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,AI}$ / $M_{R,Ze}$
5,115	321,22	356,91	0,900	0,76	333,52	0,963	208,94	1,537
6,045	241,77	262,49	0,921	0,76	247,06	0,979	176,80	1,367
7,130	183,94	195,39	0,941	0,77	185,62	0,991	149,89	1,227
8,060	151,24	157,96	0,957	0,78	151,34	0,999	132,60	1,141
9,145	124,63	127,74	0,976	0,79	123,67	1,008	116,87	1,066
10,075	108,11	109,10	0,991	0,79	106,60	1,014	106,08	1,019
11,005	95,45	94,88	1,006	0,80	93,58	1,020	97,11	0,983
12,090	84,04	82,14	1,023	0,81	81,90	1,026	88,40	0,951
13,020	76,33	73,57	1,037	0,82	74,03	1,031	82,09	0,930
14,105	69,05	65,53	1,054	0,83	66,64	1,036	75,77	0,911
15,035	64,20	59,90	1,072	0,83	61,47	1,045	71,08	0,903
17,515	53,67	48,75	1,101	0,85	51,16	1,049	61,02	0,880
20,150	46,19	40,76	1,133	0,87	43,73	1,056	53,04	0,871

Tabela 52 – Caso 4 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 4 $C_b = 0,81$			$C_b$	$C_b$ Reis		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$		$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,A} /$ $M_{R,Ze}$
6,045	371,87	404,94	0,918	0,73	364,83	1,019	297,77	1,249
7,130	280,34	297,79	0,941	0,74	271,60	1,032	252,45	1,110
8,060	228,27	238,09	0,959	0,75	219,58	1,040	223,32	1,022
9,145	185,80	189,98	0,978	0,76	177,60	1,046	196,83	0,944
10,075	159,42	160,38	0,994	0,77	151,71	1,051	178,66	0,892
11,005	139,20	137,86	1,010	0,78	131,96	1,055	163,56	0,851
12,090	121,00	117,76	1,028	0,79	114,25	1,059	148,88	0,813
13,020	108,71	104,28	1,043	0,80	102,34	1,062	138,25	0,786
14,105	97,15	91,69	1,059	0,81	91,16	1,066	127,61	0,761
15,035	89,03	82,93	1,074	0,82	83,34	1,068	119,72	0,744
17,515	72,86	65,72	1,109	0,84	67,84	1,074	102,77	0,709
20,150	61,21	53,59	1,142	0,86	56,74	1,079	89,33	0,685

Tabela 53 – Caso 5 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 5 $C_b = 0,94$			$C_b$	$C_b$ Reis		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$		$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,A} /$ $M_{R,Ze}$
5,115	359,23	413,26	0,869	0,84	371,33	0,967	224,84	1,598
6,045	270,00	303,93	0,888	0,85	275,26	0,981	190,25	1,419
7,130	205,43	226,24	0,908	0,86	207,02	0,992	161,29	1,274
8,060	169,01	182,90	0,924	0,87	168,94	1,000	142,68	1,185
9,145	139,41	147,91	0,943	0,88	138,21	1,009	125,76	1,109
10,075	121,05	126,33	0,958	0,89	119,25	1,015	114,15	1,060
11,005	106,98	109,86	0,974	0,90	104,79	1,021	104,50	1,024
12,090	94,24	95,11	0,991	0,91	91,82	1,026	95,12	0,991
13,020	85,74	85,18	1,007	0,92	83,09	1,032	88,33	0,971
14,105	77,68	75,88	1,024	0,93	74,89	1,037	81,53	0,953
15,035	72,00	69,36	1,038	0,94	69,14	1,041	76,49	0,941
17,515	60,61	56,45	1,074	0,96	57,70	1,050	65,66	0,923
20,150	52,30	47,20	1,108	0,98	49,45	1,058	57,07	0,916

Tabela 54 – Caso 5 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 5 $C_b = 0,94$			$C_b$	$C_b$ Reis		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$		$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,A}$ $N /$ $M_{R,Ze}$
6,045	408,60	468,88	0,871	0,80	399,51	1,023	320,41	1,275
7,130	309,07	344,81	0,896	0,81	298,12	1,037	271,65	1,138
8,060	251,96	275,68	0,914	0,82	241,55	1,043	240,31	1,048
9,145	205,51	219,98	0,934	0,84	195,88	1,049	211,80	0,970
10,075	176,70	185,71	0,951	0,85	167,70	1,054	192,25	0,919
11,005	154,62	159,63	0,969	0,86	146,21	1,058	176,00	0,879
12,090	134,76	136,35	0,988	0,87	126,93	1,062	160,21	0,841
13,020	121,34	120,74	1,005	0,89	113,94	1,065	148,76	0,816
14,105	108,71	106,17	1,024	0,90	101,76	1,068	137,32	0,792
15,035	99,83	96,02	1,040	0,91	93,22	1,071	128,83	0,775
17,515	82,13	76,09	1,079	0,94	76,28	1,077	110,58	0,743
20,150	69,33	62,05	1,117	0,97	64,11	1,081	96,12	0,721

Tabela 55 – Caso 6 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 6 $C_b = 1,16$			$C_b$	$C_b$ Reis		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$		$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,A}$ $N /$ $M_{R,Ze}$
5,115	417,07	508,80	0,820	1,11	489,70	0,852	249,47	1,672
6,045	322,87	374,19	0,863	1,13	364,06	0,887	211,09	1,529
7,130	251,59	278,54	0,903	1,14	274,86	0,915	178,97	1,406
8,060	210,49	225,18	0,935	1,16	225,14	0,935	158,32	1,330
9,145	176,02	182,10	0,967	1,18	185,03	0,951	139,54	1,261
10,075	154,53	155,53	0,994	1,19	160,31	0,964	126,66	1,220
11,005	137,91	135,26	1,020	1,21	141,47	0,975	115,95	1,189
12,090	122,85	117,10	1,049	1,23	124,61	0,986	105,55	1,164
13,020	112,60	104,88	1,074	1,25	113,26	0,994	98,01	1,149
14,105	102,91	93,42	1,102	1,27	102,62	1,003	90,47	1,138
15,035	96,06	85,39	1,125	1,29	95,17	1,009	84,87	1,132
17,515	82,29	69,50	1,184	1,34	80,37	1,024	72,86	1,129
20,150	72,16	58,11	1,242	1,39	69,70	1,035	63,33	1,140

Tabela 56 – Caso 6 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 6 $C_b = 1,16$			$C_b$	$C_b$ Reis		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$		$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ /	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,A}$ $N /$
	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)	$M_{R,AI}$	(kN.m)	$M_{R,Ze}$
6,045	458,10	374,19	1,224	1,53	496,07	0,923	355,53	1,289
7,130	353,83	278,54	1,270	1,55	372,73	0,949	301,42	1,174
8,060	293,12	225,18	1,302	1,56	303,93	0,964	266,64	1,099
9,145	242,86	182,10	1,334	1,58	248,39	0,978	235,01	1,033
10,075	211,34	155,53	1,359	1,59	214,12	0,987	213,32	0,991
11,005	187,01	135,26	1,383	1,61	187,98	0,995	195,29	0,958
12,090	165,00	117,10	1,409	1,63	164,55	1,003	177,76	0,928
13,020	150,07	104,88	1,431	1,64	148,76	1,009	165,07	0,909
14,105	135,95	93,42	1,455	1,66	133,94	1,015	152,37	0,892
15,035	125,99	85,39	1,475	1,67	123,55	1,020	142,94	0,881
17,515	106,02	69,50	1,526	1,71	102,89	1,031	122,70	0,864
20,150	91,44	58,11	1,573	1,75	87,97	1,039	106,66	0,857

Tabela 57 – Caso 7 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 7 $C_b = 0,95$			$C_b$	$C_b$ Reis		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS)	$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$		$M_{R,AI}$ (AISC)	$M_{R,AN}$ /	$M_{R,Ze}$ (Zeman)	$M_{R,A}$ $N /$
	(kN.m)	(kN.m)			(kN.m)	$M_{R,AI}$	(kN.m)	$M_{R,Ze}$
5,115	330,90	416,29	0,795	0,85	373,62	0,886	225,66	1,466
6,045	253,70	306,16	0,829	0,86	277,75	0,913	190,94	1,329
7,130	196,36	227,90	0,862	0,87	209,69	0,936	161,88	1,213
8,060	163,49	184,24	0,887	0,88	171,72	0,952	143,21	1,142
9,145	136,46	148,99	0,916	0,90	141,12	0,967	126,22	1,081
10,075	119,56	127,25	0,940	0,91	122,26	0,978	114,56	1,044
11,005	106,74	110,67	0,965	0,92	107,88	0,989	104,88	1,018
12,090	94,78	95,81	0,989	0,94	95,02	0,997	95,47	0,993
13,020	86,80	85,81	1,012	0,95	86,36	1,005	88,65	0,979
14,105	79,25	76,43	1,037	0,97	78,25	1,013	81,83	0,968
15,035	73,93	69,87	1,058	0,98	72,56	1,019	76,77	0,963
17,515	63,25	56,86	1,112	1,02	61,28	1,032	65,90	0,960
20,150	55,43	47,55	1,166	1,06	53,15	1,043	57,28	0,968



Tabela 58 – Caso 7 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 7 $C_b = 0,95$			$C_b$	$C_b$ Reis		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$		$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,A}$ / $M_{R,Ze}$
5,115	469,28	416,29	1,13	1,15	505,93	0,928	380,05	1,235
6,045	356,90	306,16	1,17	1,16	375,06	0,952	321,58	1,110
7,130	273,46	227,90	1,20	1,17	282,08	0,969	272,65	1,003
8,060	225,74	184,24	1,23	1,18	230,20	0,981	241,19	0,936
9,145	186,64	148,99	1,25	1,20	188,35	0,991	212,57	0,878
10,075	162,29	127,25	1,28	1,21	162,52	0,999	192,95	0,841
11,005	143,57	110,67	1,30	1,22	142,82	1,005	176,65	0,813
12,090	126,70	95,81	1,32	1,24	125,17	1,012	160,79	0,788
13,020	115,26	85,81	1,34	1,25	113,27	1,018	149,31	0,772
14,105	104,48	76,43	1,37	1,26	102,10	1,023	137,82	0,758
15,035	96,89	69,87	1,39	1,28	94,27	1,028	129,30	0,749
17,515	81,67	56,86	1,44	1,31	78,70	1,038	110,99	0,736
20,150	70,56	47,55	1,48	1,34	67,44	1,046	96,48	0,731

Tabela 59 – Caso 8 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 8 $C_b = 1,32$			$C_b$	$C_b$ Reis		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b,AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$		$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,A}$ / $M_{R,Ze}$
6,045	262,28	427,65	0,613	0,90	291,11	0,901	225,67	1,162
7,130	204,99	318,34	0,644	0,92	220,62	0,929	191,33	1,071
8,060	171,97	257,35	0,668	0,93	181,39	0,948	169,25	1,016
9,145	144,29	208,12	0,693	0,95	149,77	0,963	149,17	0,967
10,075	127,11	177,75	0,715	0,97	130,34	0,975	135,40	0,939
11,005	113,88	154,59	0,737	0,99	115,56	0,985	123,96	0,919
12,090	101,96	133,83	0,762	1,01	102,35	0,996	112,83	0,904
13,020	93,89	119,86	0,783	1,03	93,51	1,004	104,77	0,896
14,105	86,30	106,76	0,808	1,06	85,24	1,012	96,71	0,892
15,035	80,97	97,59	0,830	1,08	79,47	1,019	90,73	0,892
17,515	70,34	79,42	0,886	1,13	68,08	1,033	77,89	0,903
20,150	62,63	66,41	0,943	1,19	59,95	1,045	67,70	0,925

Tabela 60 – Caso 8 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 8 $C_b = 1,32$			$C_b$	$C_b$ Reis		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b-AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$		$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,A} /$ $M_{R,Ze}$
6,045	338,19	427,65	0,791	1,11	360,22	0,939	380,07	0,890
7,130	263,28	318,34	0,827	1,13	272,50	0,966	322,24	0,817
8,060	219,50	257,35	0,853	1,15	223,62	0,982	285,05	0,770
9,145	183,29	208,12	0,881	1,17	184,24	0,995	251,23	0,730
10,075	160,62	177,75	0,904	1,19	159,99	1,004	228,04	0,704
11,005	143,18	154,59	0,926	1,21	141,53	1,012	208,77	0,686
12,090	127,45	133,83	0,952	1,24	125,01	1,019	190,04	0,671
13,020	116,81	119,86	0,975	1,26	113,92	1,025	176,46	0,662
14,105	106,80	106,76	1,000	1,28	103,55	1,031	162,89	0,656
15,035	99,76	97,59	1,022	1,30	96,28	1,036	152,81	0,653
17,515	85,72	79,42	1,079	1,36	81,91	1,047	131,18	0,654
20,150	75,53	66,41	1,137	1,43	71,60	1,055	114,02	0,662

Tabela 61 – Caso 9 e Posição A, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 9 $C_b = 1,07$			$C_b$	$C_b$ Reis		$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b-AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$		$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,A} /$ $M_{R,Ze}$
5,115	253,99	469,66	0,541	0,64	280,80	0,905	239,69	1,06
6,045	194,74	345,41	0,564	0,65	209,10	0,931	202,81	0,96
7,130	150,61	257,12	0,586	0,66	158,18	0,952	171,95	0,876
8,060	125,68	207,86	0,605	0,67	129,82	0,968	152,11	0,826
9,145	104,76	168,09	0,623	0,68	106,95	0,980	134,06	0,781
10,075	91,90	143,57	0,640	0,69	92,88	0,989	121,69	0,755
11,005	82,03	124,86	0,657	0,70	82,15	0,998	111,40	0,736
12,090	73,13	108,09	0,677	0,72	72,58	1,008	101,41	0,721
13,020	67,11	96,81	0,693	0,73	66,15	1,015	94,16	0,713
14,105	61,45	86,23	0,713	0,74	60,12	1,022	86,92	0,707
15,035	57,47	78,82	0,729	0,76	55,91	1,028	81,54	0,705
17,515	49,51	64,15	0,772	0,79	47,58	1,041	70,00	0,707
20,150	43,72	53,64	0,815	0,83	41,59	1,051	60,84	0,719

Tabela 62 – Caso 9 e Posição B, viga de seção monossimétrica com cargas desestabilizantes

$L_b$ (m)	Caso 9 $C_b = 1,07$			$C_b$ Reis			$k_c = \frac{1}{\sqrt{C_{b-AISC}}}$	
	$M_{R,AN}$ (ANSYS) (kN.m)	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN} /$ $M_{R,AI}$	$C_b$	$M_{R,AI}$ (AISC) (kN.m)	$M_{R,AN}$ / $M_{R,AI}$	$M_{R,Ze}$ (Zeman) (kN.m)	$M_{R,A}$ $N /$ $M_{R,Ze}$
5,115	332,67	469,66	0,708	0,80	352,78	0,943	403,68	0,824
6,045	253,72	345,41	0,735	0,81	262,42	0,967	341,58	0,743
7,130	195,09	257,12	0,759	0,82	198,28	0,984	289,60	0,674
8,060	161,63	207,86	0,778	0,84	162,53	0,994	256,18	0,631
9,145	134,28	168,09	0,799	0,85	133,71	1,004	225,79	0,595
10,075	117,29	143,57	0,817	0,86	115,95	1,012	204,95	0,572
11,005	104,26	124,86	0,835	0,88	102,40	1,018	187,63	0,556
12,090	92,55	108,09	0,856	0,89	90,29	1,025	170,79	0,542
13,020	84,63	96,81	0,874	0,91	82,14	1,030	158,59	0,534
14,105	77,18	86,23	0,895	0,92	74,52	1,036	146,39	0,527
15,035	71,95	78,82	0,913	0,94	69,17	1,040	137,34	0,524
17,515	61,50	64,15	0,959	0,98	58,56	1,050	117,89	0,522
20,150	53,88	53,64	1,004	1,01	50,93	1,058	102,47	0,526